



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Superior d'Enginyeries Industrial,
Aeroespacial i Audiovisual de Terrassa

Máster Universitario en Ingeniería Industrial

Estudio de un sistema de recuperación de energía para camiones

Memoria

Autor: Mario Pérez Rioja

Director: Miguel Angel Saiz Segarra

Fecha de entrega: 20 de abril de 2017 (Q1 2016-17)



ÍNDICE

Abstract	11
Agradecimientos	12
1 Introducción	13
1.1 Objeto.....	13
1.2 Alcance.....	13
1.3 Requisitos.....	14
1.4 Justificación.....	14
2 Antecedentes y Estado del Arte	16
2.1 El vehículo híbrido	16
2.1.1 Estructura	18
2.1.1.1 Híbrido en serie	18
2.1.1.2 Híbrido en paralelo	20
2.2 El KERS	23
2.2.1 ¿Qué tipos de KERS existen?	24
2.2.1.1 Sistema KERS eléctrico.....	24
2.2.1.2 Sistema KERS mecánico.....	25
2.2.1.3 Sistema KERS hidráulico.....	26
2.2.2 ¿De dónde viene y dónde se aplica actualmente?.....	27
2.3 Sistemas en la actualidad	28
2.3.1 Sistema Híbrido de Bosch	28
2.3.2 Toyota Prius Híbrido	30
2.3.2.1 Motor	31
2.3.2.2 Transmisión.....	33
2.3.2.3 Batería.....	36

2.3.2.4	Generador	37
2.3.2.5	Motor Eléctrico	37
2.3.2.6	Inversor	37
2.3.2.7	Instalación de alta tensión	38
2.3.2.8	Sistema de control	38
2.3.2.9	Frenado regenerativo	39
2.3.3	Honda Civic IMA	40
2.3.3.1	Funcionamiento	43
2.3.3.2	Motor	44
2.3.3.3	Motor eléctrico	45
2.3.3.4	Transmisión	45
2.3.3.5	Batería	46
2.3.3.6	Frenado regenerativo	46
3	Diseño conceptual del sistema	48
3.1	Método de funcionamiento	48
3.1.1	Modo convencional	48
3.1.2	Modo híbrido	48
3.1.3	Modo regenerativo	49
3.2	Cálculos	49
3.2.1	Principio físico	52
3.2.2	Modelización de rutas	53
3.2.3	Dinámica del vehículo	60
3.2.3.1	Resistencia del vehículo	61
3.2.3.2	Ecuación dinámica	68
3.2.3.3	Cálculo del par resistivo en las subidas	70
3.2.3.4	Cálculo de variación de energía en bajada	71
3.2.3.5	Cálculo de potencia generada	74
3.3	Componentes del sistema	76
3.3.1	Motor/Generador eléctrico	76



3.3.1.1	Definición de requisitos.....	77
3.3.1.2	Propuesta de alternativas	77
3.3.1.3	Selección de alternativas.....	78
3.3.2	Batería.....	79
3.3.2.1	Definición de requisitos.....	79
3.3.2.2	Propuesta de alternativas	81
3.3.2.3	Selección de alternativas.....	82
3.3.3	Conexiónado eléctrico	83
3.3.4	Transmisión.....	83
3.3.4.1	Modo convencional.....	84
3.3.4.2	Modo híbrido	85
3.3.4.3	Modo regenerativo.....	85
4	Viabilidad medioambiental	87
5	Viabilidad económica	89
6	Conclusiones	92
7	Trabajos futuros	93
8	Resumen económico	96
9	Bibliografía.....	97

ÍNDICE DE IMÁGENES

Imagen 1 Esquema del sistema híbrido en serie.....	19
Imagen 2 Elementos del sistema híbrido en serie.....	20
Imagen 3 Esquema del sistema híbrido en paralelo.....	21
Imagen 4 Elementos del sistema híbrido en paralelo.....	21
Imagen 5 Diferencia entre configuraciones de vehículo híbrido	22
Imagen 6 Esquema funcionamiento sistema KERS eléctrico.....	24
Imagen 7 Esquema funcionamiento sistema KERS mecánico.....	25
Imagen 8 Esquema funcionamiento sistema KERS hidráulico.....	26
Imagen 9 McLaren MP4-25 equipado con sistema KERS.....	27
Imagen 10 AMC Amitron de 1967.....	27
Imagen 11 Vista explosionada del IMG de Bosch.....	28
Imagen 12 Ubicación del IMG de Bosch.....	29
Imagen 13 Elementos del sistema híbrido de Bosch.....	30
Imagen 14 Elementos del sistema híbrido del Toyota Prius.....	31
Imagen 15 Disposición del sistema en el Toyota Prius	33
Imagen 16 Modos de funcionamiento del sistema híbrido.....	33
Imagen 17 Esquema interno de la transmisión	34
Imagen 18 Esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión	35
Imagen 19 Esquema de componentes del sistema de transmisión.....	35
Imagen 20 Ubicación de baterías	36
Imagen 21 Sistema de control THS II	39
Imagen 22 Componentes del Honda Civic IMA.....	41
Imagen 23 Modos de funcionamiento del sistema	44
Imagen 24 Configuración del Motor del Honda Civic IMA	44
Imagen 25 Esquema del inversor del Honda Civic IMA.....	45
Imagen 26 Motor/Generador del Honda Civic IMA.....	45
Imagen 27 Transmisión variable continua.....	46
Imagen 28 Configuración de la unidad de almacenamiento de energía	46
Imagen 29 Fuerzas sobre el vehículo durante el desplazamiento [7].....	61
Imagen 30 Fuerzas sobre el neumático en un medio duro (a) y uno blando (b) [7].	62
Imagen 31 Shape drag [7]	65
Imagen 32 Conjunto de fuerzas que actúan sobre el vehículo en una pendiente....	67



Imagen 33 Esquema de la transmisión tipo PSD propuesta	84
Imagen 34 Esquema de la Transmisión en funcionando en modo convencional	85
Imagen 35 Esquema de la Transmisión en funcionando en modo híbrido	85
Imagen 36 Esquema de la Transmisión en funcionando en modo regenerativo	86

ÍNDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Ratio de funcionamiento motor eléctrico / motor térmico	22
Gráfico 2 Gráfica de par y potencia del vehículo híbrido	32
Gráfico 3 Gráfica de par y potencia del motor eléctrico (THS y THS II).....	37
Gráfico 4 Frenado regenerativo (THS y THS II)	40
Gráfico 5 Comparativa frenado regenerativo y frenado hidráulico.....	40
Gráfico 6 Par y potencia del Honda Civic IMA	42
Gráfico 7 Comparativa del frenado hidráulico y el frenado regenerativo	47
Gráfico 8 Curva de potencia del motor D13C – Euro 5 / EEV [6]	51
Gráfico 9 Ejemplo de diagrama de alturas para una ruta	54
Gráfico 10 Situación de los puntos más relevantes.....	54
Gráfico 11 Acotación de la distancia entre los puntos más relevantes	54
Gráfico 12 Ejemplo de curva modelizada.....	55
Gráfico 13 Comprobación de la aproximación entre modelo y real	55
Gráfico 14 Modelo resultado de la ruta BZ.....	56
Gráfico 15 Modelo resultado de la ruta BM.....	56
Gráfico 16 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BZ.	64
Gráfico 17 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BM.....	64
Gráfico 18 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BZ.	68
Gráfico 19 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BM.....	68
Gráfico 20 Fuerza total a lo largo de la ruta BZ.....	69
Gráfico 21 Fuerza total a lo largo de la ruta BM.....	70
Gráfico 22 Par resistivo total en subida de la ruta BZ.	70
Gráfico 23 Par resistivo total en subida de la ruta BM.....	71
Gráfico 24 Energía perdida total en la ruta BZ	72
Gráfico 25 Energía perdida total en la ruta BM.	73
Gráfico 26 Energía total generada y perdida en la ruta BZ	73
Gráfico 27 Energía total generada y perdida en la ruta BM.....	73
Gráfico 28 Energía generada real en la ruta BZ.....	74
Gráfico 29 Energía generada real en la ruta BM.....	74
Gráfico 30 Energía generada real en la ruta BZ.....	75
Gráfico 31 Energía generada real en la ruta BM.....	75
Gráfico 32 Capacidad de la batería en la ruta BZ	80



Gráfico 33 Capacidad de la batería en la ruta BM.....	80
Gráfico 34 Capacidad de la batería en la ruta BZ	80
Gráfico 35 Capacidad de la batería en la ruta BM.....	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Parque de vehículos pesados 2005-2015. DGT [1].....	15
Tabla 2 Ventajas e inconvenientes de los vehículos híbridos.....	18
Tabla 3 Comparativa entre THS y THS II.....	31
Tabla 4 Características técnicas del modelo considerado en el estudio [6].....	50
Tabla 5 Características de las rutas consideradas para el estudio.....	53
Tabla 6 Características de la ruta BZ.....	58
Tabla 7 Características de la ruta BM.....	60
Tabla 8 Coeficientes de resistencia a la rodadura [7].....	63
Tabla 9 Coeficientes de resistencia aerodinámica para cada tipo de vehículo [7]...	66
Tabla 10 Alternativa 1 de Motor/Generador eléctrico	77
Tabla 11 Alternativa 2 de Motor/Generador eléctrico	78
Tabla 12 Alternativa 3 de Motor/Generador eléctrico	78
Tabla 13 Evaluación VTP de Motor/Generador eléctrico.....	79
Tabla 14 Alternativa 1 de Baterías.....	81
Tabla 15 Alternativa 2 de Baterías.....	81
Tabla 16 Alternativa 3 de Baterías.....	82
Tabla 17 Evaluación VTP de Baterías	82
Tabla 18 Características del cable SABIX A 146 FRNC.....	83
Tabla 19 Evaluación de emisiones de CO ₂ actual.....	87
Tabla 20 Evaluación de emisiones de CO ₂ con el sistema de regeneración	88
Tabla 21 Evaluación de emisiones de CO ₂ total	88
Tabla 22 Evaluación económica actual.....	89
Tabla 23 Resumen de la evaluación económica con el sistema de regeneración ...	90
Tabla 24 Resumen del coste de instalación del sistema	91
Tabla 25 Estimación de tiempo para la propuesta 1	94
Tabla 26 Estimación de tiempo para la propuesta 2	95



ABSTRACT

This study is focused in the existing possibilities of energy regeneration during the trips that trucks make every day. This regenerated energy would be delivered to the transmission of the vehicle decreasing the quantity of energy delivered by the combustion engines. This evaluation opens the possibility of a huge reduction of CO₂ emissions to the atmosphere.

Once the results have been obtained it has been done a selection of the necessary components for the system, and has been purposed a system that fulfils with the requirements obtained during the feasibility study.

Finally, it would be analysed the environmental and economic viability that will show the necessary information about the possibilities of implementation of the purposed system.



AGRADECIMIENTOS

A mi director del trabajo por su ayuda y soporte en este estudio.

A mi amigo Santi su predisposición siempre a tender una mano para ayudar.

A mi hermano Marcos, quien ha aportado un gran valor a este trabajo con su experiencia.

A mi familia y a Caterina, por aguantar todo y más durante esta travesía.

1 INTRODUCCIÓN

1.1 OBJETO

El objeto del presente trabajo es el de realizar un estudio de viabilidad de un sistema de recuperación de energía para camiones que genere energía durante los descensos.

Se realizará la modelización de dos rutas para efectuar la evaluación de viabilidad. Tras esto se realizará un análisis exhaustivo de los datos obtenidos y las tecnologías desarrolladas evaluando las alternativas posibles para la composición del sistema.

1.2 ALCANCE

Los siguientes puntos serán considerados para la realización de este estudio:

- Se realizará un estudio de viabilidad técnica evaluando las posibilidades de generación de energía con casos particulares.
- Se realizará un estudio de viabilidad económica sobre el sistema propuesto.
- Se realizará un estudio del impacto medioambiental del sistema propuesto.
- Se realizará una propuesta conceptual de un sistema de regeneración de energía en base a los resultados obtenidos.
- Se realizará un análisis exhaustivo de los resultados y su interpretación.

Los puntos a continuación mostrados no serán realizados en el proyecto:

- NO se realizará ningún diseño 2D ni 3D.
- NO se realizará el diseño en detalle de ninguno de los componentes.
- NO se realizará la selección de materiales de cada uno de los elementos.
- NO incluye la situación de los elementos en vehículo.

1.3 REQUISITOS

A continuación se definirán los requisitos del presente estudio:

- Para la realización de la propuesta del sistema, el estudio viabilidad técnica deberá asegurar las posibilidades de generación de energía.
- El sistema de regeneración de energía propuesto debería ser capaz de suplir el 20% de la energía aportada por el motor de combustión.
- Toda la energía que se considera aportada por el sistema propuesto deberá de ser energía regenerada.
- El sistema no podrá obtener energía procedencia de otras fuentes de alimentación.

1.4 JUSTIFICACIÓN

Con el paso del tiempo, cada vez más, se puede observar que la contaminación y el cuidado del medioambiente están adquiriendo mayor importancia. No es de extrañar el día en que los telediarios muestran ciudades con exceso de polución en sus calles, llegando a niveles altamente peligrosos para el correcto desarrollo de la vida cotidiana de sus ciudadanos. Además, la aceleración del cambio climático es algo que se va acusando cada vez más por todos los sistemas que emiten partículas nocivas al medioambiente.

El sector de la automoción es uno de los sectores más asociados a este tema, y día tras día se pueden observar las medidas y/o restricciones que se van aplicando con tal de reducir la cantidad de elementos no deseados que se emiten.

Dentro del sector de la automoción se encuentra el transporte pesado de largo recorrido, como son los camiones con remolque, más conocidos como tráileres. Debido a su gran envergadura y elevado peso, estos vehículos consumen grandes cantidades de combustible a diario. Si a todo esto se añade la gran cantidad de empresas logísticas que existen hoy en día, y de desplazamientos que realizan, se puede observar que una mejora en estos sistemas podría tener un elevado impacto para el medioambiente.

Según recoge la Dirección General de Tráfico en sus estadísticas, el parque de camiones de carga total que había durante el período que se comprende entre 2005 y 2015 era el siguiente:

PARQUE DE CAMIONES SEGÚN CARGA

Años	Hasta 999 kg	De 1000 a 1499 kg	De 1500 a 2999 kg	De 3000 a 4999 kg	De 5000 a 6999 kg	De 7000 a 9999 kg	De 10000 kg y más	TOTAL
2005	1438701	393734	131466	86189	45713	72499	122640	2290942
2006	1606891	427175	135845	87857	47334	75421	126797	2507320
2007	1762458	456758	140417	88673	48869	77994	129711	2704880
2008	1818928	465831	141350	88239	49646	78617	127697	2770308
2009	1831056	465062	139822	86353	49345	77403	122894	2771935
2010	1847720	458427	138273	84137	48720	75818	117802	2770897
2011	1844642	450664	134678	88244	48032	73969	111967	2752196
2012	1824166	438842	131951	80022	46731	71087	104105	2696904
2013	1792844	426781	131495	78779	45757	68873	98707	2643236
2014	1776056	425381	121859	77016	45180	67595	96021	2609108
2015	1762858	422632	119834	77366	45125	67310	96022	2591147

Tabla 1 Parque de vehículos pesados 2005-2015. DGT [1]

Estos vehículos, cuyo combustible es el gasoil, emiten grandes cantidades de elementos contaminantes. Según los datos que recoge el Ministerio de Fomento del gobierno de España, cada vehículo pesado de carga general realiza un kilometraje medio anual de unos 120.000 km, de los cuales el 85% de ellos los realiza en carga y el 25% restante en vacío. Estos desplazamientos son realizados con un consumo medio de 36 L/100km [2], con lo que anualmente se estima que el gasto de combustible es de

$$120.000 \text{ km} \cdot 0,85 \cdot \frac{36 \text{ L}}{100 \text{ km}} = 36.720 \text{ L de Gasoil}$$

Según los datos de la Dirección General de Tráfico, con el parque de vehículos pesados de más de 10.000 kg de carga, que es el tipo de vehículo que nos ocupa en el presente estudio, en 2015 había 96.022 unidades, con lo que el consumo durante ese año se podría estimar en

$$36.720 \text{ L} \cdot 96.022 \text{ veh.} = 3.525.927.840 \text{ L de Gasoil}$$

Si por cada litro de gasoil se están emitiendo aproximadamente 2,6 kg de CO₂, las emisiones se podrían estimar en

$$3.525.927.840 \text{ L de Gasoil} \cdot \frac{2,6 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ L Gasoil}} = 9.167.412.384 \text{ kg CO}_2$$

Se estarían emitiendo cerca de 9.200 toneladas de CO₂ a la atmosfera.

Es por este principal motivo por el cual se considera necesario aplicar tecnologías que reduzcan estas cantidades de emisiones.

2 ANTECEDENTES Y ESTADO DEL ARTE

Para comprender el sistema que se quiere evaluar en el presente estudio se va a comenzar introduciendo el concepto de vehículo híbrido y los sistemas de freno regenerativo.

2.1 EL VEHÍCULO HÍBRIDO

El concepto de vehículo híbrido se refiere al vehículo que realiza sus desplazamientos con más de un sistema de propulsión. Lo más habitual, a día de hoy, es que estos vehículos consten de un sistema de propulsión de combustión interna y otro eléctrico, que pueden funcionar de manera simultánea o por separado, como se observa más adelante.

Debido a los problemas que tienen los vehículos eléctricos en cuanto a energía específica obtenida de las baterías, y su limitación en cuanto a velocidad y autonomía, actualmente son los automóviles híbridos los que ofrecen una solución más satisfactoria.

A diferencia de los automóviles eléctricos, hay vehículos híbridos que no necesitan conectarse a una toma para recargar sus baterías, ya que el generador y el sistema de frenado regenerativo se encargan de mantener la carga de las mismas. Al utilizar el motor térmico para recargar las baterías, se necesitan menor número de estas por lo que el peso total del vehículo es menor.

Tradicionalmente, los motores que han propulsado a los automóviles convencionales han sido sobredimensionados con respecto a lo estrictamente necesario para un uso habitual. La nota dominante ha sido, y es aún, equipar con motores capaces de dar una potencia bastante grande, pero que sólo es requerida durante un mínimo tiempo en la vida útil de un vehículo. Los híbridos se equipan con motores de combustión interna, diseñados para funcionar con su máxima eficiencia. Si se genera más energía de la necesaria, el motor eléctrico se usa como generador y carga las baterías del sistema. En otras situaciones, funciona sólo el motor eléctrico, alimentándose de la energía guardada en la batería. En algunos híbridos es posible recuperar la energía

cinética al frenar, que suele disiparse en forma de calor en los frenos, convirtiéndola en energía eléctrica. Este tipo de frenos se suele llamar "regenerativos", concepto que se explica más adelante.

La combinación de un motor de combustión operando a su máxima eficiencia, y la recuperación de energía mediante sistemas regenerativos, hace que estos vehículos alcancen mejores rendimientos que los vehículos convencionales. Para ello se dispone de un sistema electrónico que determina qué motor usar y en qué momento hacerlo.

Los sistemas híbridos se pueden clasificar en función de su configuración:

- Paralelos: tanto la parte eléctrica como la térmica pueden hacer girar las ruedas.
- En serie: solo la parte eléctrica da tracción, el motor térmico se utiliza para generar electricidad.

También se pueden clasificar según el tipo de carga de las baterías:

- Regulares: se recargan por el funcionamiento normal del vehículo.
- Enchufables: se recargan conectándose a la red eléctrica.

Todo esto presenta una serie de ventajas y desventajas que se muestran a continuación:

Ventajas	Inconvenientes
Esta tecnología ha permitido conseguir que el consumo de combustible sea de un 20% hasta un 60% menor que en vehículos comparables de tipo convencional.	Los vehículos híbridos tienen menos potencia (CVs) que automóviles convencionales comparables. No obstante, el avance de esta tecnología apunta a aminorar esta brecha y tanto la velocidad máxima del vehículo, como la autonomía son parecidas a los puramente térmicos.
Se maximiza el rendimiento del uso del combustible, pues los motores de combustión interna para híbridos son fabricados pensando en el mayor rendimiento.	Mayor peso que un coche convencional (hay que sumar el motor eléctrico y, sobre todo, las baterías), y por ello un incremento en la energía necesaria para desplazarlo. El peso del vehículo se puede aminorar usando carrocerías más ligeras de aluminio, fibra de carbono o fibra de vidrio.
Reducción de emisión de gases dañinos para el medio ambiente y los seres vivos.	

Ventajas	Inconvenientes
	<p>Más complejidad, lo que dificulta las revisiones y reparaciones del vehículo.</p> <p>La inversión inicial es mayor para adquirir un "híbrido" que para adquirir un "convencional" comparable. Sin embargo, el ahorro económico que le entrega el menor consumo de combustible le devuelve esa inversión.</p>

Tabla 2 Ventajas e inconvenientes de los vehículos híbridos

2.1.1 ESTRUCTURA

Como se ha comentado anteriormente, la configuración de un vehículo híbrido depende de la disposición de los elementos que lo componen, por lo que se pueden clasificar en híbridos serie e híbridos en paralelo.

2.1.1.1 Híbrido en serie

En estos vehículos el motor de combustión proporciona movimiento a un generador que, o bien carga las baterías, o bien suministra la potencia directamente al sistema de propulsión (motor eléctrico) y por lo tanto reduce la demanda a la batería.

El dispositivo generador se utiliza principalmente como un amplificador de prestaciones, por lo que en la mayoría de los kilómetros se circula con las baterías. Cuando la exigencia del sistema supera la capacidad de la batería, el dispositivo generador se enciende. Para exigencias mayores, el generador puede ser conectado automáticamente cuando las baterías alcanzan un nivel predeterminado de descarga.

El motor térmico impulsa un generador eléctrico que recarga las baterías, y alimenta al motor, o motores eléctricos, y estos son los que impulsan al vehículo.

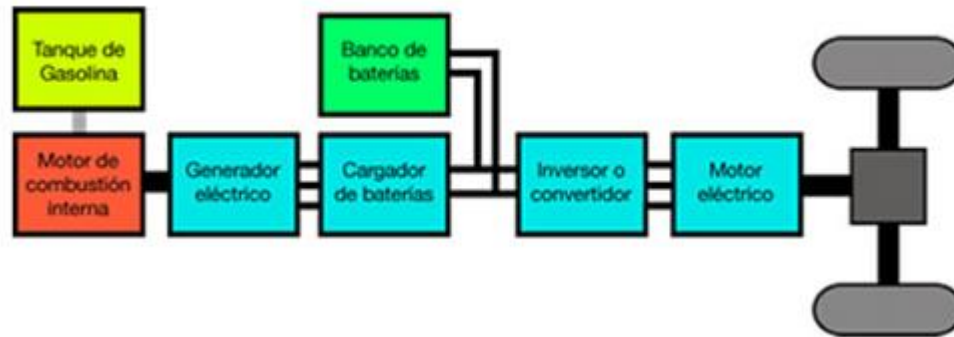


Imagen 1 Esquema del sistema híbrido en serie

Dependiendo del rango de velocidades que se quieran ofrecer el elemento generador debe ser mayor o menor. En un principio se propusieron soluciones de bajo rango de velocidades, pero la tendencia hoy en día es la de ir a un rango mayor, lo que implica sistemas de generación mucho mayores. El dimensionado de la batería se realiza en función de los picos de demanda.

De esta manera, a altas velocidades, sólo parte de la energía proviene de las baterías, siendo éstas las que suministran la potencia necesaria para aceleraciones y adelantamientos. A velocidad de crucero, la potencia sobrante generada se utiliza para recargar las baterías. Este sistema resulta eficiente si aproximadamente el 80% de los kilómetros recorridos son alimentados por la energía de las baterías que se han recargado desde la red. En caso contrario es difícil la justificación de este tipo de propulsión híbrida ya que la energía eléctrica de las baterías proviene en realidad de la combustión del motor térmico.

La principal ventaja que ofrece este diseño frente al paralelo es la de un diseño mecánico simple. Se dispone de un motor térmico diseñado y optimizado para trabajar siempre en el mismo régimen de revoluciones.

La desventaja de este tipo de vehículos es que toda la energía producida por el motor térmico tiene que pasar por el generador eléctrico sufriendo muchas pérdidas, debido a la transformación de energía mecánica a eléctrica, y toda la energía para la tracción tiene que pasar por el motor eléctrico.

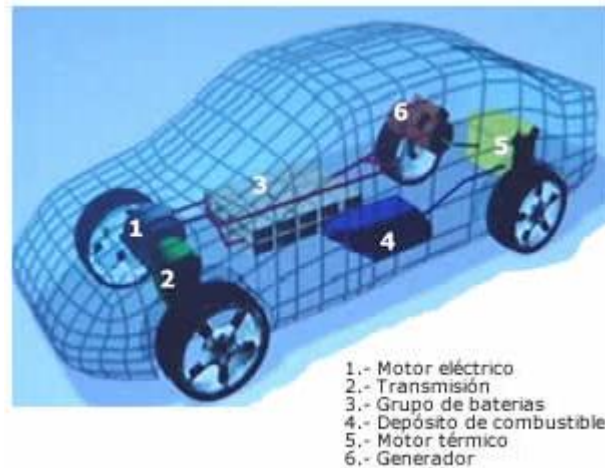


Imagen 2 Elementos del sistema híbrido en serie

2.1.1.2 Híbrido en paralelo

Este tipo de vehículo utiliza dos sistemas de tracción en paralelo. Según esta configuración ambos proveen de potencia a las ruedas de modo que los dos sistemas pueden ser utilizados independientemente o simultáneamente para obtener una potencia máxima.

Aunque mecánicamente más complejo, este método evita las pérdidas inherentes a la conversión de energía mecánica en eléctrica que se da en los híbridos en serie. Además como los picos de demanda de potencia le corresponden al motor de combustión interna, las baterías pueden ser mucho menores.

El motor de combustión entra en funcionamiento cuando el vehículo tiene una mayor demanda de energía. Durante la detención del vehículo, el híbrido aprovecha la energía normalmente empleada en frenar para recargar su propia batería (frenado regenerativo).

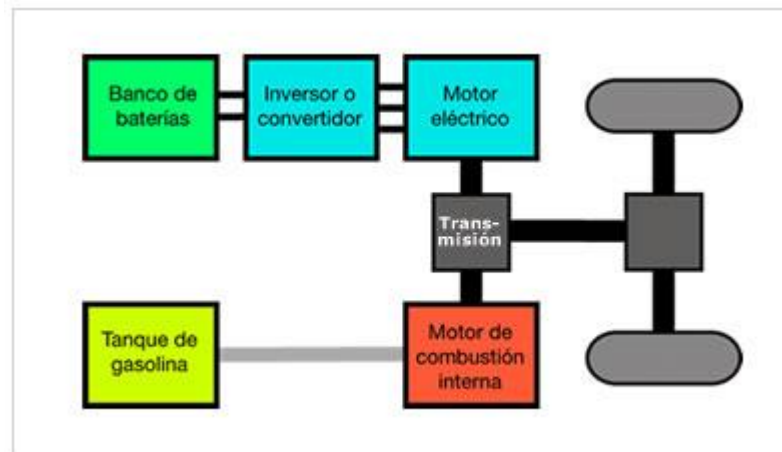


Imagen 3 Esquema del sistema híbrido en paralelo

Debido a que los patrones de uso de los automóviles tienden a viajes cortos y frecuentes, un híbrido en paralelo trabajaría la mayor parte del tiempo sólo con motor eléctrico. Este funcionamiento sería el ideal, aunque la realidad demuestra que actualmente las baterías de los híbridos tienen muy poca autonomía y por lo tanto estos vehículos funcionan mayormente impulsados por el motor térmico.

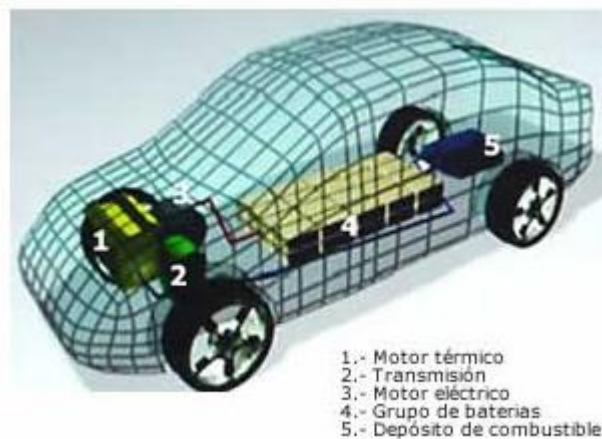


Imagen 4 Elementos del sistema híbrido en paralelo

Dentro de los vehículos híbridos paralelos podemos distinguir dos arquitecturas: los que usan un generador independiente para cargar las baterías, o los que aprovechan el motor eléctrico para funcionar también como generador.

- Con generador independiente: su inconveniente es que tiene más componentes, el generador, el conversor de corriente alterna a corriente continua y la transmisión ente el motor térmico y el generador por lo que será más pesado y caro. Sin embargo tiene la ventaja que el generador al estar

diseñado para funcionar sólo como generador, será más eficiente que el caso en que el motor esté funcionando como generador.

- Usando el motor eléctrico como generador: se disminuye el número de componentes, pero puede disminuir el rendimiento.

El vehículo híbrido paralelo con generador independiente también es clasificado como vehículo híbrido paralelo-serie. Esta configuración combina las ventajas de ambos sistemas y es la más utilizada por los fabricantes de automóviles como por ejemplo: Toyota en su modelo Prius.

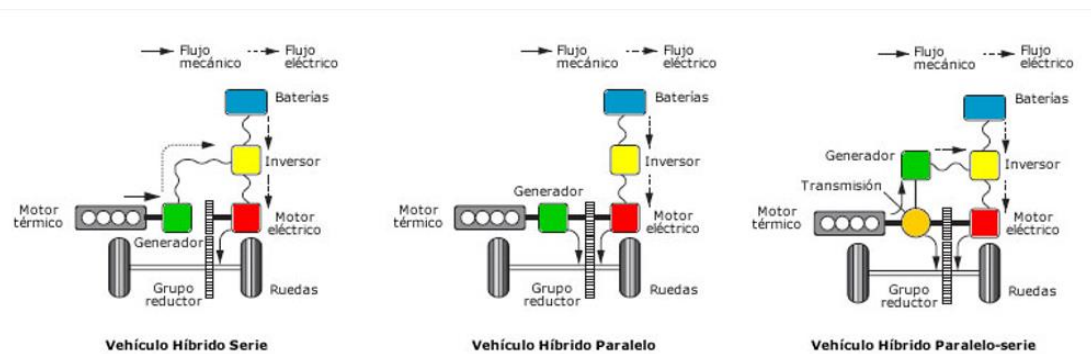
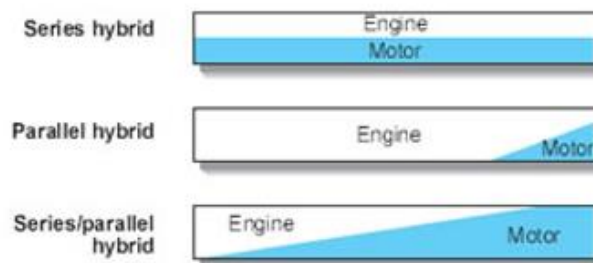


Imagen 5 Diferencia entre configuraciones de vehículo híbrido

Los tiempos de funcionamiento del motor eléctrico (Motor) y del motor térmico (Engine) se reparten en distinta proporción dependiendo de la configuración del vehículo híbrido. Para verlo más claro tenemos la gráfica que aparece a continuación, donde se ve que en el híbrido serie los tiempos de funcionamiento se reparten por igual al 50%, en el híbrido paralelo sin embargo funciona mucho más el motor térmico y en el híbrido paralelo/serie funciona más tiempo el motor eléctrico. [3]



Gráfica del ratio de funcionamiento motor eléctrico/motor térmico

Gráfico 1 Ratio de funcionamiento motor eléctrico / motor térmico

2.2 EL KERS

El freno dinámico es un conjunto de sistemas de frenado que se aplica cuando los motores eléctricos de tracción de un vehículo son usados como generadores para disminuir la velocidad de éste. Existen dos variantes de freno dinámico, que serían el freno reostático y el regenerativo. Se denomina freno reostático cuando la electricidad generada es disipada en forma de calor por medio de resistencias, y freno regenerativo cuando la energía producida es devuelta a la línea de alimentación o es almacenada en baterías para uso futuro. El freno dinámico reduce el desgaste de los componentes del sistema de freno convencional y, adicionalmente, puede reducir el consumo de energía. [4]

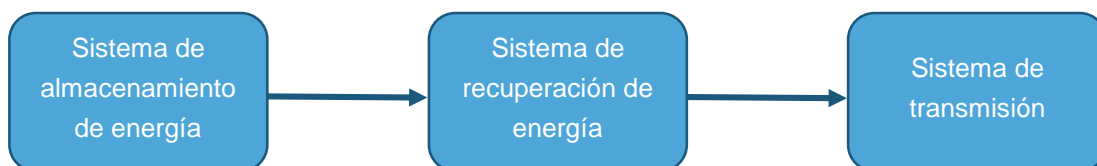
El KERS, del inglés Kinetic Energy Recovery System (sistema de recuperación de energía cinética), es un sistema de frenado regenerativo que permite colaborar en la reducción de la velocidad de un vehículo almacenando parte de su energía cinética para posteriormente aportarla como energía para impulsar el vehículo. De esta forma se consigue que, parte de la energía que se disipa a través de los frenos, sea aprovechada para el funcionamiento del vehículo en cuestión.

Lo que se logra es que parte de la energía de funcionamiento del vehículo venga aportada por el propio sistema de recuperación de energía, anteriormente disipada, reduciendo la aportada por la principal fuente de alimentación.

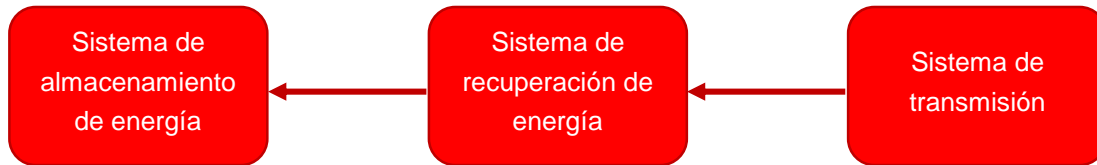
Este sistema se basa en el principio de que un motor eléctrico puede utilizarse como generador eléctrico. El motor eléctrico de tracción actúa como generador durante el frenado y los terminales de alimentación se convierten en suministradores de energía, la cual se conduce hacia una carga eléctrica; es esta carga la que provee el efecto de frenado. De aquí se derivan los demás sistemas que se definen en los siguientes apartados.

El esquema del principio de funcionamiento quedaría de la siguiente manera:

Durante la ACELERACIÓN:



Durante la FRENADA:



2.2.1 ¿QUÉ TIPOS DE KERS EXISTEN?

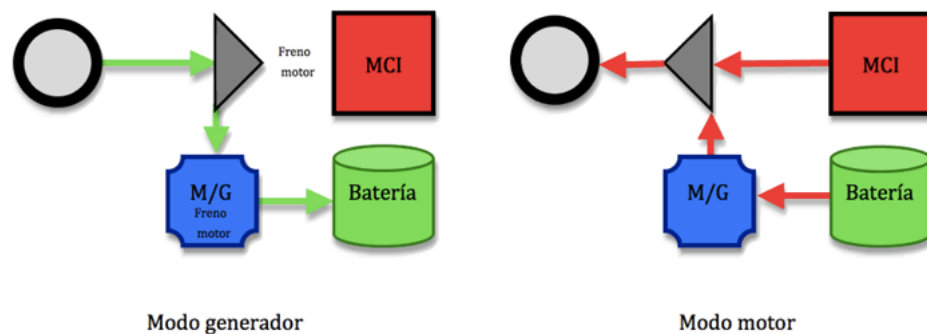
Los sistemas KERS que a priori se pueden usar para recuperar energía son los siguientes:

- Sistema KERS eléctrico
- Sistema KERS mecánico
- Sistema KERS hidráulico

Siendo los más utilizados, el eléctrico y el mecánico, a continuación se explicará el funcionamiento de cada uno de ellos para poder observar las diferencias entre cada sistema.

2.2.1.1 Sistema KERS eléctrico

Esquema de un sistema KERS de tipo eléctrico:



© Juan Antonio "Maikchang" Marchán para www.efectosuelo.com

Imagen 6 Esquema funcionamiento sistema KERS eléctrico

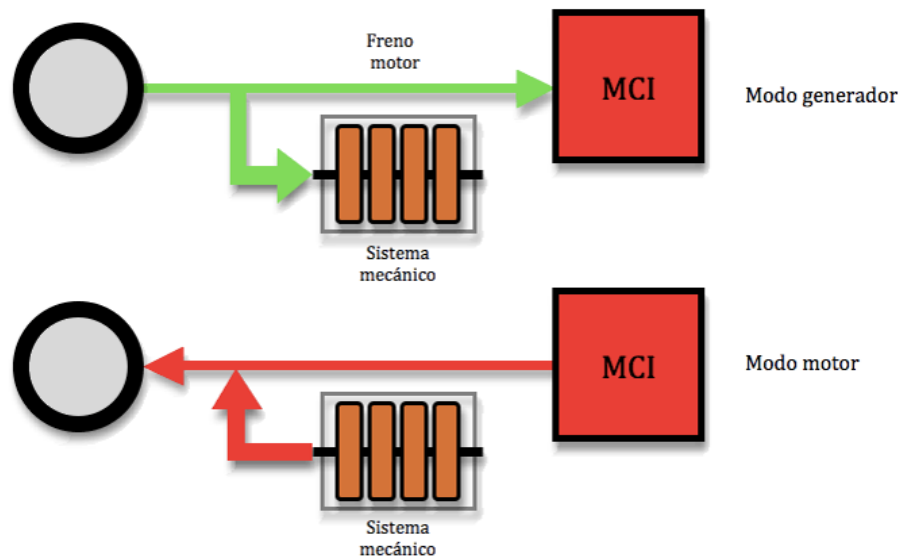
Aprovechando las capacidades reversibles de las máquinas eléctricas, se dispone un motor/generador en la línea de tracción de tal manera que durante las frenadas funciona de generador y durante la aceleración actúa como motor eléctrico junto con al de combustión.

Al accionar el freno, el motor generador, aplica una restricción al movimiento relacionado con el campo magnético, de tal manera que ésta es vencida por el propio movimiento del vehículo. Esto implica que parte de la energía cinética del vehículo se emplee en vencer esa resistencia magnética citada, lo que induce un movimiento del generador, que hará que dicha energía se convierta en eléctrica. Parte de esta energía se perderá en rozamientos y temperaturas, mayormente, pero una gran parte de la misma terminará almacenada en las baterías eléctricas.

Esto implica que además del motor generador, es necesario un paquete de baterías con unas características muy concretas que sirvan para almacenar y suministrar la electricidad en la cantidad y con la velocidad adecuadas. Por tanto, este sistema consta de un motor/generador dentro de la línea de tracción del vehículo, un sistema de gestión y como no, un sistema de almacenamiento de energía, en este caso unos acumuladores eléctricos.

2.2.1.2 Sistema KERS mecánico

Esquema de un sistema KERS de tipo mecánico:



© Juan Antonio "Markchang" Marchán para www.efectosuelo.com

Imagen 7 Esquema funcionamiento sistema KERS mecánico

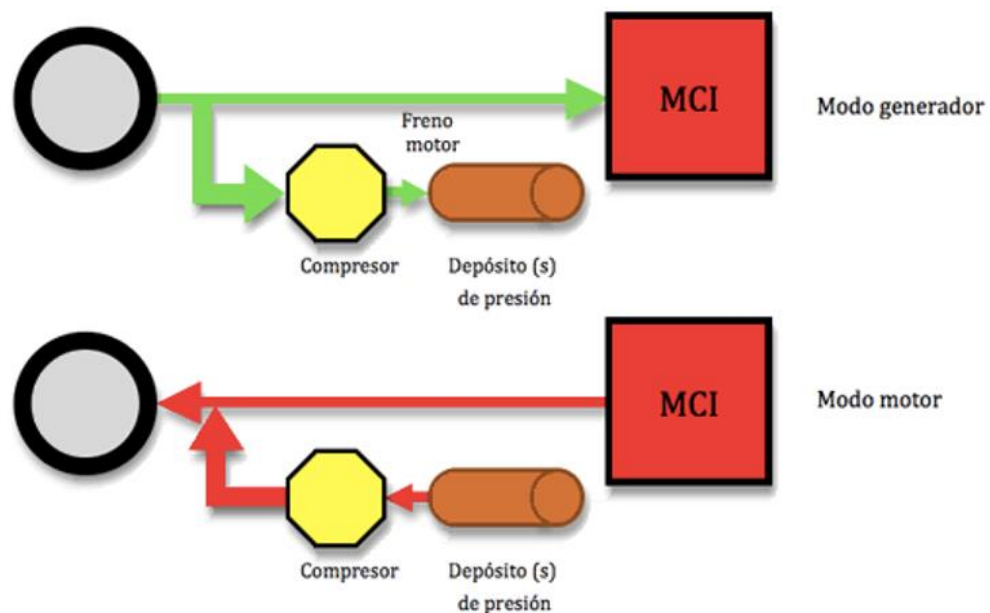
De igual manera que en el eléctrico, se dispone un sistema en la línea de tracción para almacenar energía pero en este caso, de forma totalmente mecánica. Para ello se dispone un disco o conjunto de discos con una masa concreta, que durante la frenada se conectan al sistema de transmisión ofreciendo una resistencia al movimiento del vehículo que los hace girar. Una vez terminada la frenada, estos

discos siguen girando almacenando parte de la energía disipada en la frenada como energía cinética de rotación.

Al activar el sistema KERS, el conjunto de discos de inercia se acopla y el movimiento de los discos se devuelve a la línea de tracción. Intuitivamente, se desprende de la idea que se necesitan discos con peso y velocidad de giro, adecuados y altos. El principio de funcionamiento es similar al del volante de inercia de los vehículos comerciales.

2.2.1.3 Sistema KERS hidráulico

Esquema de un sistema KERS de tipo hidráulico:



© Juan Antonio "Markchang" Marchán para www.efectosuelo.com

Imagen 8 Esquema funcionamiento sistema KERS hidráulico

En este caso, se usa un sistema hidráulico para almacenar la energía. Durante la frenada un compresor comprime un gas en un recipiente aumentando la presión en él, convirtiendo parte de la energía cinética del monoplaza en trabajo del compresor, y por extensión en variación de presión del depósito o recipiente.

Una vez que termina la frenada, esta energía queda almacenada hasta que se activa el sistema KERS y el compresor pasa a funcionar a la inversa, dejando salir gas del depósito. Esa variación de presión, ahora negativa, mueve el compresor ofreciendo un par extra a la línea de tracción.

2.2.2 ¿DE DÓNDE VIENE Y DÓNDE SE APLICA ACTUALMENTE?

El sistema de freno regenerativo no es un concepto nuevo, que nace a raíz de la Formula 1, sino que se remonta a la década de los 60. El primer freno dinámico se aplicó en 1967 al vehículo Amitron.

El KERS, como tal, se introdujo en la Fórmula 1 en la temporada 2009, para promover la investigación y desarrollo de tecnologías favorables al medio ambiente y que de su uso en competición se pudieran extraer enseñanzas que luego se pudiesen aplicar en los coches de calle.



Imagen 9 McLaren MP4-25 equipado con sistema KERS

Anteriormente el freno regenerativo fue desarrollado en 1967 para el vehículo Amitron de American Motors Corporation (AMC) y Gulton Industries. El Amitron funcionaba en su totalidad por baterías que eran recargadas por frenado regenerativo, lo que incrementaba el rendimiento energético del propio automóvil.



Imagen 10 AMC Amitron de 1967

Considerado uno de los vehículos más promisorios de cara al futuro, el AMC Amitron equipaba dos baterías de níquel-cadmio de 11 Kg y dos de litio de 34 kg (nominal de 150 vatios-hora por libra, o 331 horas vatios por kg) para impulsar el vehículo por 241 km a una velocidad de 80 km/h.[5]

2.3 SISTEMAS EN LA ACTUALIDAD

A continuación se exponen diferentes sistemas que han sido desarrollados por distintas compañías:

2.3.1 SISTEMA HÍBRIDO DE BOSCH

El sistema híbrido de Bosch a diferencia de otros, es un sistema que se puede utilizar en distintos modelos y fabricantes de vehículos. Se trata de un sistema híbrido de configuración en paralelo a diferencia de otros sistemas como el del famoso Toyota Prius que tiene una configuración paralelo-serie.

El sistema híbrido de Bosch está compuesto por un Motor Generador Integrado (IMG), un sistema electrónico de potencia refrigerado y una batería de níquel metal hidruro NiMH que también cuenta con un sistema de refrigeración.

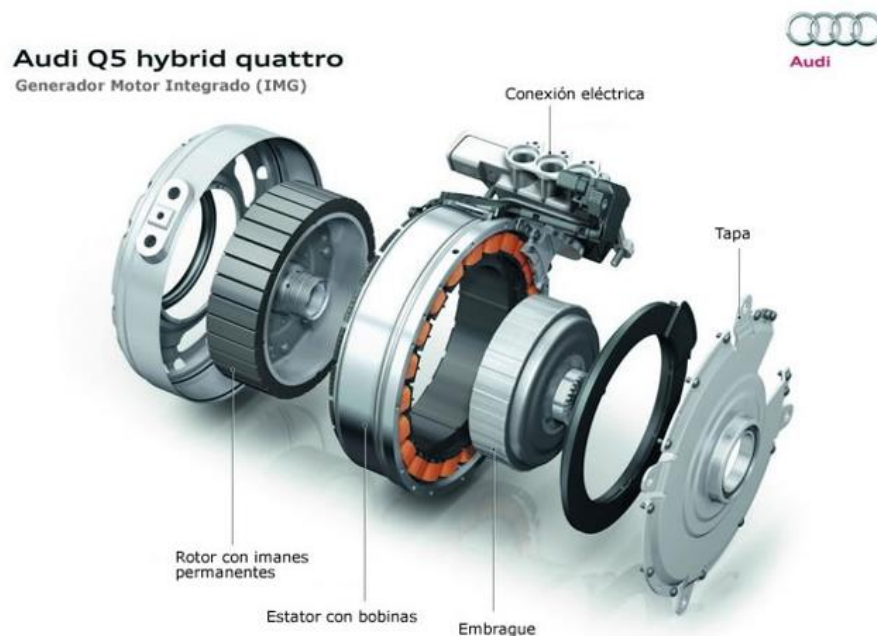


Imagen 11 Vista explosionada del IMG de Bosch

Junto a los componentes centrales, como el sistema electrónico de potencia y el generador motor eléctrico, Bosch también suministra al fabricante el sistema de control inteligente de última generación, que gestiona la interacción entre el motor de combustión y el motor eléctrico. El sistema Motronic, para vehículos híbridos, se

encarga de regular cuándo trabaja el motor eléctrico, cuándo el motor de combustión y cuándo trabajan ambos motores de forma simultánea.

Como hemos dicho antes, el sistema híbrido de Bosch tiene una configuración paralela, lo que representa una gran exigencia técnica, puesto que en lugar de desviar la potencia a través de un engranaje planetario, el sistema de control y de regulación distribuye los pares de accionamiento entre el motor eléctrico y el motor de combustión. Con ello se reducen costes y complejidad a la hora del montaje.

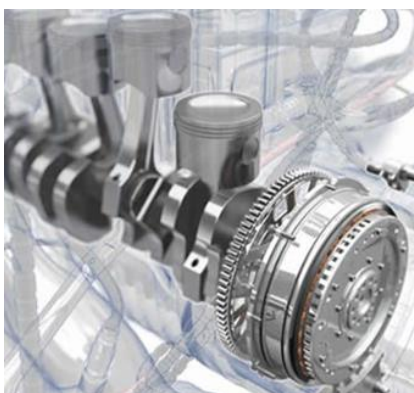


Imagen 12 Ubicación del IMG de Bosch

En el caso que sea necesario, durante fuertes aceleraciones, el motor eléctrico trabaja al mismo tiempo que el motor de combustión, proporcionando un extra de potencia al vehículo.

Al frenar el vehículo, el motor eléctrico funciona como alternador y recupera la energía cinética que se acumula en la batería de alto voltaje. Cuando el conductor deja de pisar el acelerador se activa la llamada “función por inercia” hasta una velocidad de unos 160 Km/h. Entonces, el motor de combustión se apaga automáticamente y el vehículo rueda libremente sin consumir combustible, pero todos los sistemas de seguridad y de confort siguen funcionando sin limitación alguna.

El sistema electrónico de potencia es un componente central que hace de puente entre el alto voltaje del accionamiento eléctrico y los 12 V de la red de a bordo, y cuyo inversor transforma la corriente continua de la batería en corriente alterna trifásica para el motor eléctrico y viceversa.

También este sistema híbrido incluye la función Start&Stop apagando el motor cuando el vehículo se detiene, por ejemplo al parar el vehículo en semáforos, para el ahorro de gasolina. Siempre que el estado de carga de la batería lo permita, arrancan de forma puramente eléctrica cuando se ha de iniciar la marcha. El motor de combustión

entra más tarde en acción. Además, cuando el conductor levanta el pie del acelerador, se apaga el motor de combustión. [3]

Audi Q5 hybrid quattro

Localización de componentes del sistema híbrido

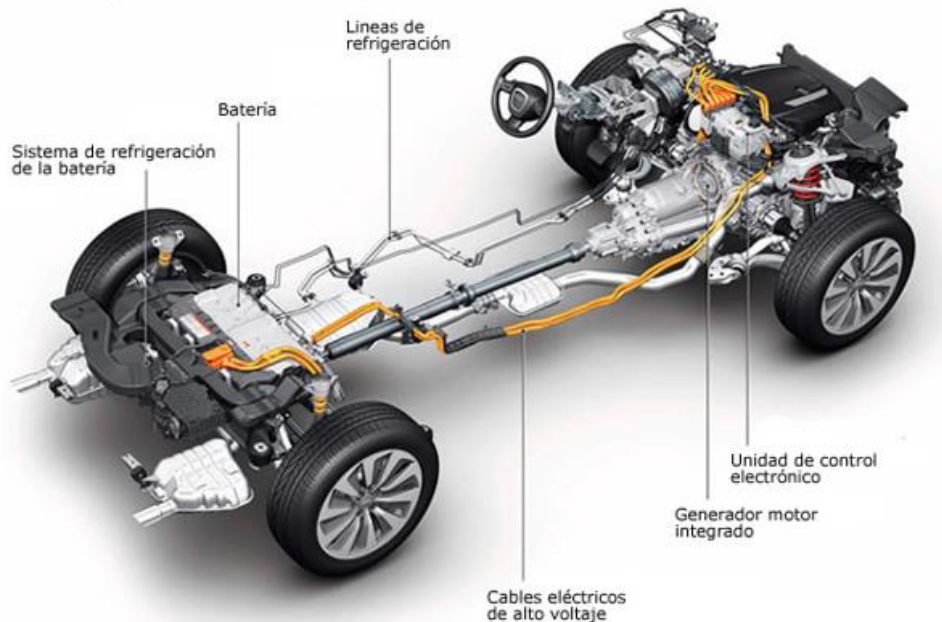


Imagen 13 Elementos del sistema híbrido de Bosch

2.3.2 TOYOTA PRIUS HÍBRIDO

El Toyota Prius, uno de los híbridos más demandado entre los compradores de este tipo de vehículos, funciona con gasolina pero gasta menos que un Diésel convencional (4,3 L/100 km) y ha sido en su momento el modelo que emitía menos CO₂ del mercado, con sólo 104 gr/km; un 30% menos que el resto de turismos. El motivo de esta capacidad es la tecnología Hybrid Sinergy Drive (HSD), desarrollada por Toyota, y que combina un motor térmico con otro eléctrico alimentado por unas baterías que se recarga con la fuerza de las frenadas. Se trata de una tecnología técnicamente compleja, con la dificultad añadida de que todos los componentes extra que precisa deben ocupar el mismo espacio que habitualmente ocupa el motor de un automóvil convencional.

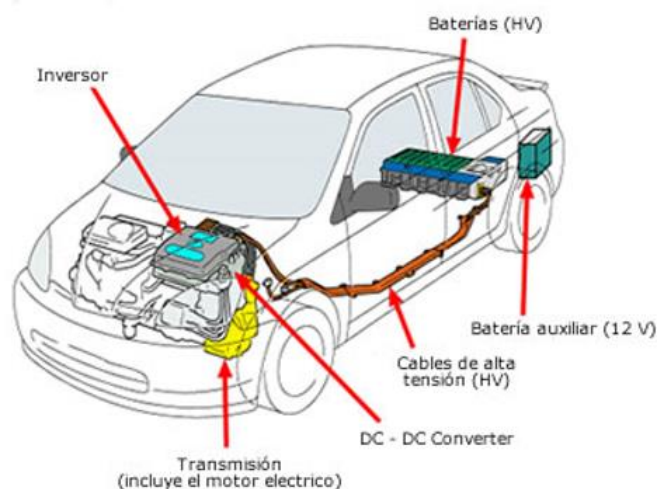


Imagen 14 Elementos del sistema híbrido del Toyota Prius

El Toyota Prius ha evolucionado con los años montando una nueva versión (THS II) que ha mejorado la primera versión THS (Toyota Hybrid System), como se resume a continuación:



Evolución	
THS	THS II
	
1997	2003
Primer híbrido de producción en masa	Reducción de costes -70%

Tabla 3 Comparativa entre THS y THS II

2.3.2.1 Motor

Para el funcionamiento del Toyota Prius se dispone de dos motores; por una parte, tenemos un motor de gasolina de 1,5 litros, con 78 CV de potencia máxima a 5.000 rpm. Por otra, recibe el soporte de un motor eléctrico, con una potencia máxima equivalente a 68 CV (50 kW), con lo que, en el momento en que los dos trabajan de forma simultánea, se logra una potencia total de unos 111 CV. El par máximo es muy elevado (alrededor de 400 Nm), en comparación con los vehículos convencionales, desde que el motor se encuentra parado y hasta las 1.200 rpm.

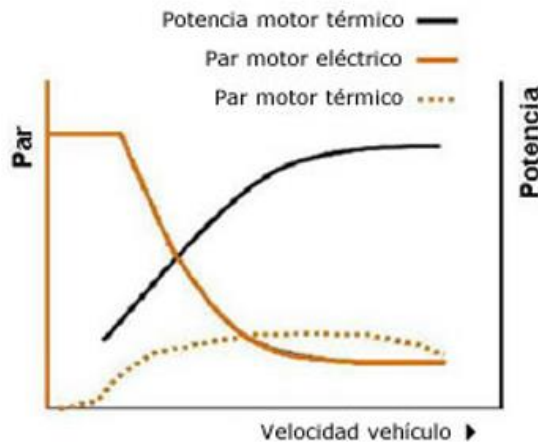


Gráfico 2 Gráfica de par y potencia del vehículo híbrido

Con todo ello los consumos de combustible anunciados por Toyota son de 4,3 litros a los 100 kilómetros en ciclo combinado, 4,2 litros cada 100 kilómetros en carretera y 5 litros cada 100 kilómetros en ciudad.

El funcionamiento de este vehículo establece que el motor eléctrico es el que actúa a bajas velocidades y cuando no se exige un rendimiento mecánico elevado. El motor de combustión, en cambio, entra en funcionamiento cuando se aumenta la velocidad o se solicita más potencia. Una de las grandes ventajas de este coche es que no necesita alimentación externa, es decir, su batería no precisa ser recargada, ya que las inercias durante las frenadas y el funcionamiento del motor de explosión recargan la batería de ion-litio.

El Toyota Prius tiene un motor eléctrico permanentemente engranado al diferencial de la transmisión, sin ningún tipo de embrague, con lo que el motor eléctrico y las ruedas son siempre solidarios.

Para hacer girar a las ruedas, el motor eléctrico puede estar impulsado de forma eléctrica (por una batería, un generador o ambas cosas a la vez) o mecánicamente (por un motor de gasolina). El motor térmico nunca mueve directamente las ruedas; su fuerza se aprovecha para mover a un generador eléctrico o para mover mecánicamente al motor eléctrico.

Con la electricidad que produce el generador eléctrico, al ser impulsado por el motor de gasolina, se puede: hacer trabajar el motor eléctrico, almacenar la energía en la batería o ambas cosas al mismo tiempo.

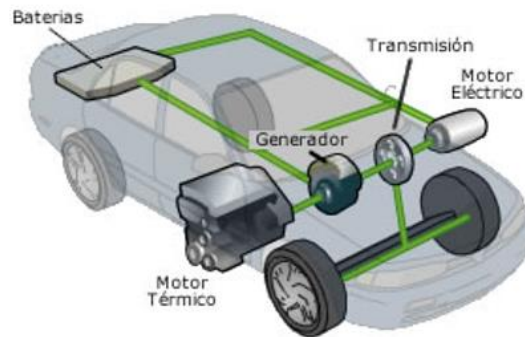


Imagen 15 Disposición del sistema en el Toyota Prius

La batería sirve como fuente de electricidad para todo el coche. Obtiene la energía de dos sistemas: del motor térmico a través del generador y del motor eléctrico cuando éste no impulsa al coche (en ese caso, el motor eléctrico se convierte en otro generador).

En la imagen siguiente se puede observar los distintos modos de funcionamiento a los que se puede ver sometido el vehículo.



Imagen 16 Modos de funcionamiento del sistema híbrido

El sistema está controlado por una centralita que distribuye la fuerza de cada elemento, de acuerdo con la fuerza que sea necesaria en cada momento y con el nivel de carga de la batería.

2.3.2.2 Transmisión

Toyota denomina a la transmisión utilizada en el Prius como "Power Split Device". Esta transmisión no tiene una caja de cambios convencional, sino que dispone de un engranaje planetario para transmitir el movimiento a las ruedas. El hecho de no tener una caja de cambio convencional aporta ventajas notables y especialmente necesarias en un coche como éste como la reducción de peso, aumento del espacio y disminución de las pérdidas por rozamiento.

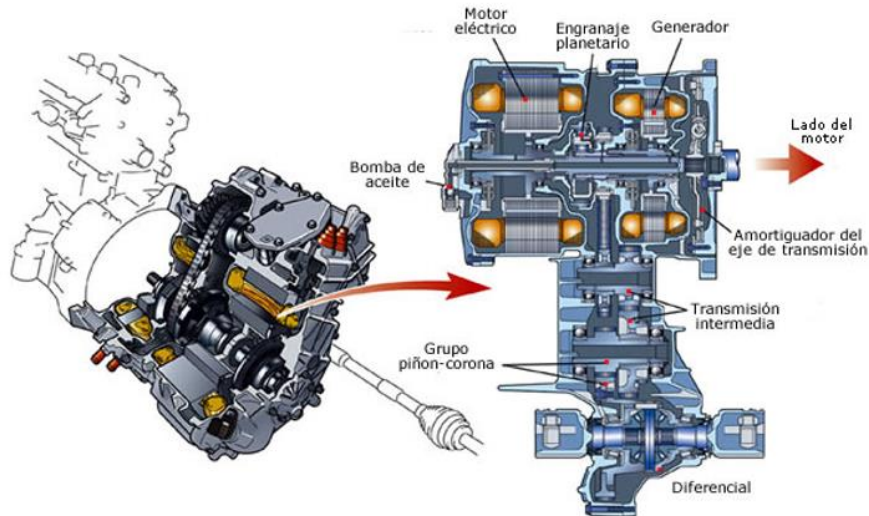


Imagen 17 Esquema interno de la transmisión

Dado que el motor funciona la mayoría del tiempo prácticamente a plena carga y con un margen de revoluciones no muy amplio, hacía falta un elemento que (en esas condiciones) sirviera tanto para arrancar en marcha lenta y como para ir a gran velocidad. Ese elemento es el engranaje planetario, que tiene tres elementos: un «planeta» o engranaje central; unos «satélites» que giran alrededor de él; y una «corona» con un dentado interior a la cual también están engranados los satélites.

El engranaje planetario utilizado en esta transmisión une cada uno de sus componentes (figura inferior):

- Engranaje central o "planetario" está unido al generador eléctrico.
- El porta-satélites está unido al motor térmico.
- La corona está unida al motor eléctrico.

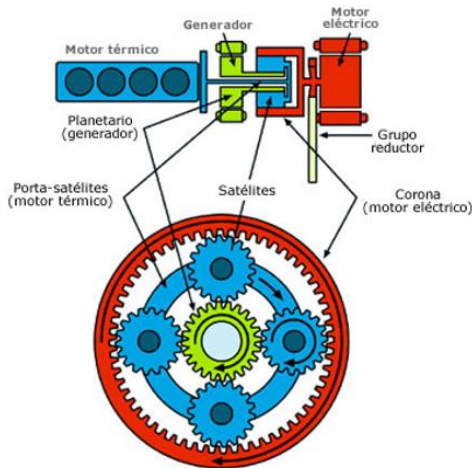


Imagen 18 Esquema del engranaje planetario utilizado en la transmisión

El giro del generador eléctrico puede ser mayor o menor, en función de la resistencia que oponga. A medida que el coche va aumentando su velocidad, el generador eléctrico opone menos resistencia y su velocidad de giro aumenta, con lo que el desarrollo se hace más largo. En el caso que las baterías no intervengan en la aceleración toda la fuerza de la que dispone el coche provendría del motor térmico. También puede llegar a las ruedas bien a través del motor eléctrico, alimentado por el generador, o bien directamente a través del motor térmico, si el generador no actúa.

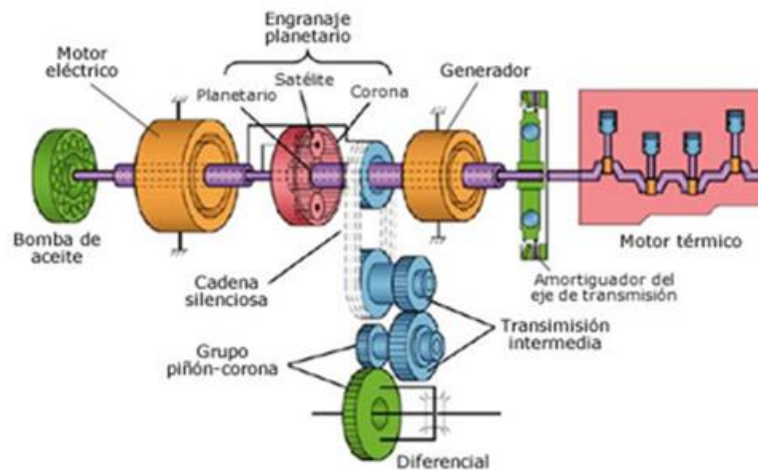


Imagen 19 Esquema de componentes del sistema de transmisión

Siempre que el coche está en movimiento, la corona del engranaje planetario también se mueve. La fuerza para moverse proviene del motor eléctrico directamente o del empuje que le da el motor térmico. Cuanto más lenta es la velocidad del coche, tanto mayor fuerza proviene del motor eléctrico. Cerca de la velocidad máxima, toda la fuerza proviene del motor térmico.

Hay varias condiciones de funcionamiento posibles, pero en cualquiera de ellas el principio de funcionamiento es el mismo. La energía que suministra el generador no depende sólo de su giro. El sistema puede variar o eliminar completamente el par resistente del generador para adecuar la energía que genera a cada condición de funcionamiento.

Esta transmisión no dispone de marcha atrás, de esta función se encarga el motor eléctrico que puede girar en ambos sentidos, por lo tanto la marcha atrás se hará siempre con el motor eléctrico, para esta función no se utiliza el motor térmico.

2.3.2.3 Batería

La batería que incorpora el Toyota Prius es de níquel e hidruro metálico, fabricada por Panasonic. Proporciona 202V, tiene 6,5 Ah de capacidad (3 horas) y pesa 42 kg.

Esta batería sólo se recarga con el generador, al que impulsa el motor térmico y no tiene ningún tipo de conexión a una red o a otro dispositivo de carga.

Estas baterías están diseñadas de tal forma que nunca se alcancen niveles de carga bajos durante el funcionamiento del vehículo. En el momento en el que el coche queda parado y desconectado, el proceso de descarga se produce lentamente de manera que no sufre el conocido 'efecto memoria' debido a que el sistema eléctrico.

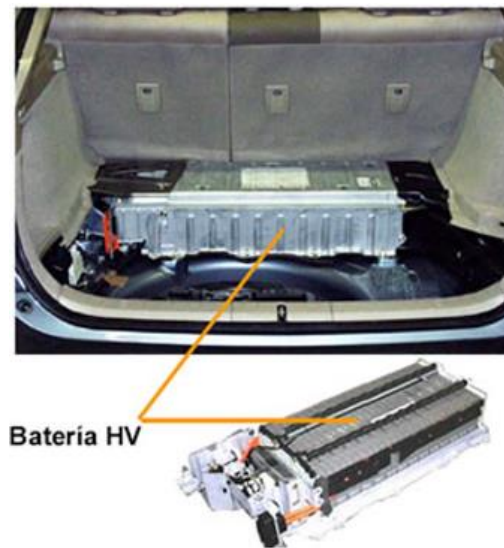


Imagen 20 Ubicación de baterías

2.3.2.4 Generador

El generador es el elemento que transforma el trabajo del motor térmico en electricidad, funcionando también como motor de arranque. Es de corriente alterna síncrono y, como máximo, gira al doble de régimen que el motor térmico.

2.3.2.5 Motor Eléctrico

El motor eléctrico fabricado por Toyota, es un motor síncrono de imanes permanentes de neodimio. Funciona a 500 V y puede dar 50 kW entre 1.200 y 1.540 rpm con un par máximo de 400 Nm hasta 1.200 rpm, y un peso de 104 kg.

Dado el desarrollo de transmisión que tiene el coche y su velocidad máxima (170 km/h), el régimen máximo del motor eléctrico es unas 6.150 rpm.

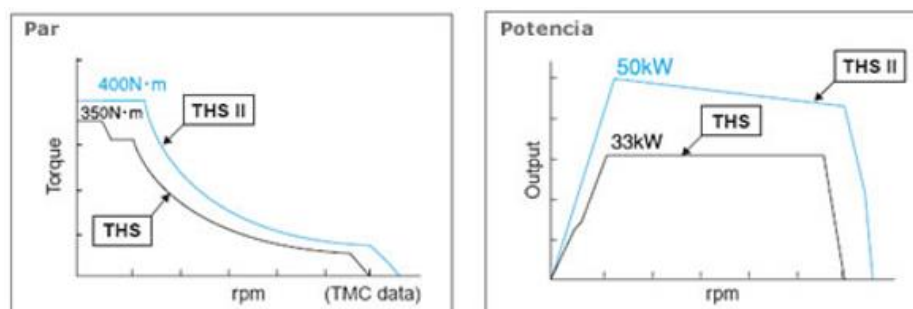


Gráfico 3 Gráfica de par y potencia del motor eléctrico (THS y THS II)

2.3.2.6 Inversor

El inversor se encarga de transformar y gestionar el flujo de electricidad entre la batería y el motor eléctrico. Además posee un convertidor integrado que envía parte de la electricidad del sistema a la batería auxiliar de 12 V.

El inversor se encarga de las siguientes funciones:

- Convierte los 201,6 V DC (corriente continua) que entrega la batería HV en 201,6 V AC trifásica (corriente alterna). Multiplica estos 201,6 V AC trifásica hasta un máximo de 500 V AC trifásica al motor y generador eléctricos del THSD
- Convierte los 201,6 V DC en 201,6 V AC para el compresor eléctrico del aire acondicionado.
- Convierte los 201,6 V DC en 12V DC y 100 A. para recargar la batería de 12V, dada la ausencia de alternador y alimentar a los demás elemento eléctricos del vehículo como la iluminación, audio o ventilación.

2.3.2.7 *Instalación de alta tensión*

Existen dos instalaciones eléctricas; por un lado la instalación de alta tensión, para el sistema de propulsión, que funciona con 500 V, y otra instalación de 12 V para el resto de sistemas eléctricos del vehículo. Para reducir peso y costes, la red de 500 V es de aluminio.

Para mantener la seguridad este sistema incorpora sensores que cortan la corriente en caso de accidente o cortocircuito.

2.3.2.8 *Sistema de control*

El sistema de control de THS II se encarga de gestionar la energía utilizada por el vehículo para su movimiento, así como también la de los dispositivos auxiliares. El sistema monitorea los requisitos y las condiciones operativas de componentes del sistema híbrido; el motor térmico que es la fuente de energía para el vehículo híbrido; el generador, que se utiliza como motor de arranque para el motor térmico y además convierte la energía del motor térmico excedente en electricidad; el motor eléctrico, que mueve el vehículo usando la energía eléctrica de la batería; y la batería, que almacena la energía eléctrica generada a través de la regeneración de electricidad por el motor eléctrico durante la desaceleración. El sistema de control también tiene en cuenta las informaciones que recibe del sensor de freno, sensor de velocidad, posición del acelerador, así como cuando el conductor actúa sobre la palanca de cambio:

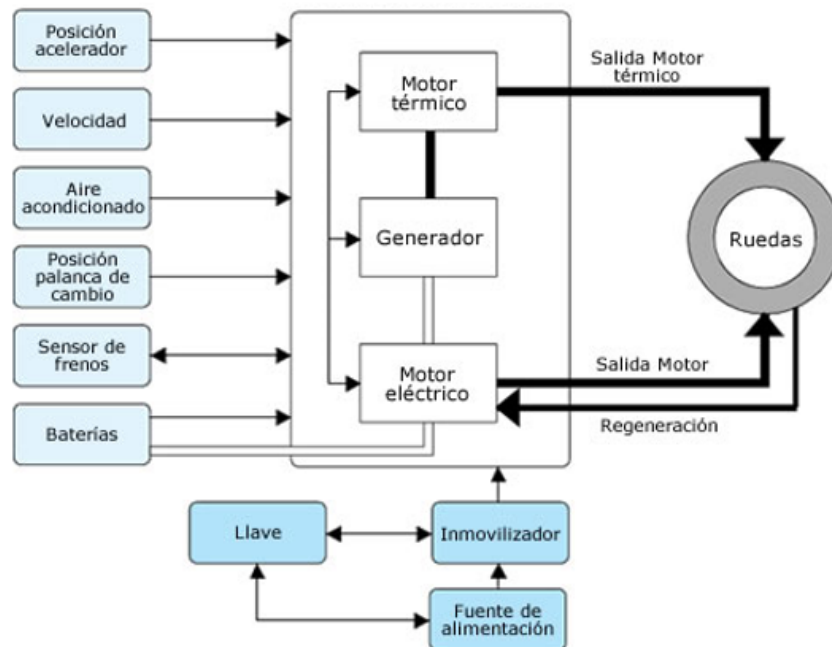


Imagen 21 Sistema de control THS II

2.3.2.9 Frenado regenerativo

El sistema de frenado regenerativo funciona en el momento en el que el vehículo comienza a disminuir la velocidad, ya sea utilizando el motor térmico como freno o bien al pulsar el pedal de freno. En esta situación el motor eléctrico funciona como un generador, convirtiendo la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, la cual se usa para cargar las baterías. Este sistema es particularmente efectivo en recuperar energía cuando se circula por ciudad, donde se producen aceleraciones y deceleraciones frecuentes. En el momento en que se pisa el pedal de freno, el sistema controla la coordinación entre el freno hidráulico del ECB (Electronic Control Braking) y el freno regenerativo y preferentemente usa el freno regenerativo, de esta manera se recupera energía aun en velocidades bajas del vehículo. Con este sistema se consigue una regeneración de energía muy eficiente. En la gráfica inferior se ve como se ha evolucionado el sistema de frenado regenerativo en el THS II con respecto a su antecesor.

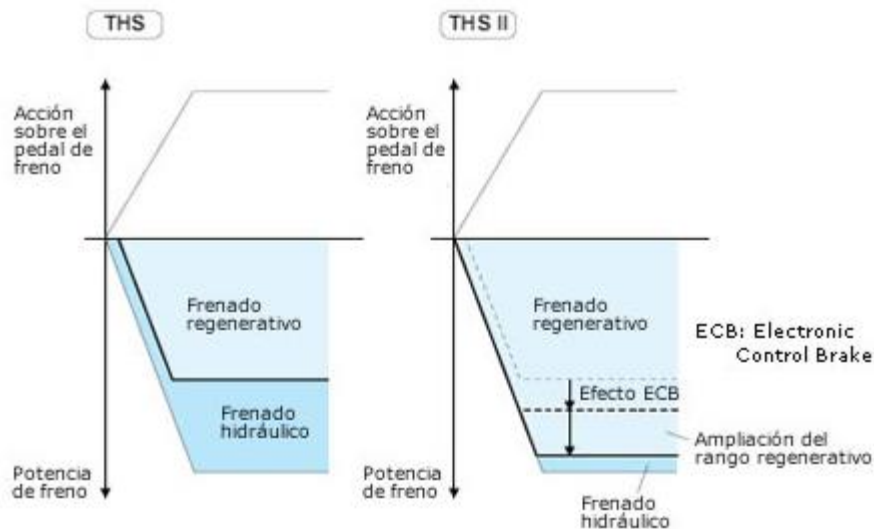


Gráfico 4 Frenado regenerativo (THS y THS II)

Las pérdidas por rozamiento en la transmisión son mínimas ya que el movimiento de las ruedas se transmite a través del diferencial y los engranajes intermedios al motor eléctrico que se convierte, en este caso, en generador. El sistema de frenado regenerativo consigue recuperar un 65%, aproximadamente, de la energía eléctrica que carga las baterías. [3]

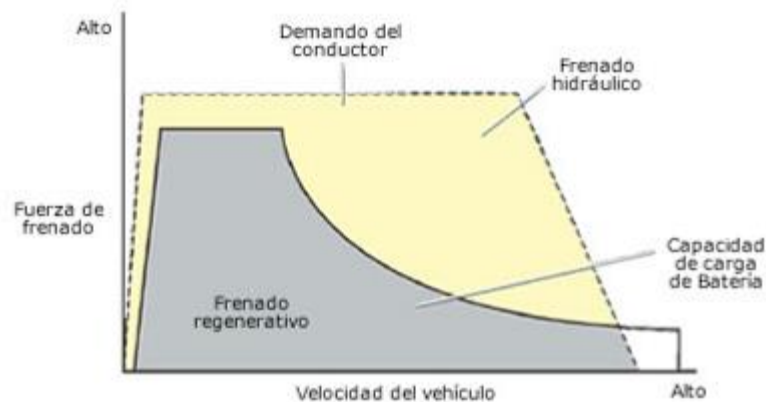


Gráfico 5 Comparativa frenado regenerativo y frenado hidráulico

2.3.3 HONDA CIVIC IMA

Honda comenzó su andadura con los vehículos híbridos con el innovador modelo Insight en el año 1999, continuando con la introducción posterior del Civic IMA (Integrated Motor Assist) evolucionado con un motor eléctrico que apoya al motor de combustión, así como el Toyota Prius, que se decanta por los mismos elementos para

funcionar aunque de forma inversa, puesto que es el de combustión el que apoya al motor eléctrico.



Imagen 22 Componentes del Honda Civic IMA

Lo que más destaca del Honda Civic IMA es su sistema propulsor, que se compone de un motor de gasolina asistido por uno eléctrico de forma inteligente. En conjunto desarrollan una potencia de 115 CV a 6.000 rpm frente a los 90 CV del modelo anterior. De la potencia total del vehículo, 95 CV a 6.000 rpm corresponden al motor de gasolina 1.3 i-DSi VTEC y 20 CV a 2.000 rpm al motor eléctrico, deduciendo que el motor eléctrico sólo desarrollará su función hasta ese bajo régimen y ayudará en aceleraciones leves. La principal ventaja de este sistema es que desarrolla una potencia y unas prestaciones comparables con las de un motor de gasolina, obteniendo unos consumos equivalentes a los de un motor diésel

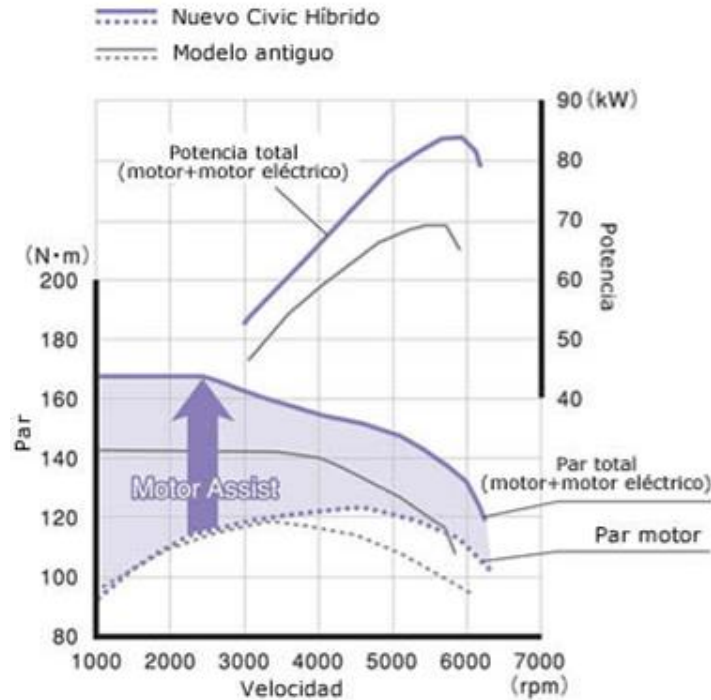


Gráfico 6 Par y potencia del Honda Civic IMA

Este sistema detiene el motor de gasolina automáticamente cuando el coche se detiene por completo y el conductor mantiene el pie en el freno (con las condiciones de que la temperatura exterior esté entre -12 y 38°C, la batería esté suficientemente cargada, el motor de gasolina no esté a baja temperatura y no esté conectado el servicio eléctrico que deshace el hielo del parabrisas). Cuando el conductor libera el pedal del freno, el motor térmico se pone en marcha automáticamente de una forma rápida y sin generar altas vibraciones, o ruidos elevados.

El sistema de transmisión también contribuye a que el coche sea silencioso, ya que hace que el motor funcione a un régimen muy bajo (cuando la posición D de la palanca de cambios está activada). Por el contrario, si se pisa súbitamente el acelerador, aumenta el ruido del motor sin que se note una gran aceleración, ya que se alcanza un régimen alto. Es una característica de los coches que tienen transmisión por variador (CVT) y motores poco potentes.

Analizando la arquitectura del IMA, cabe señalar que una de las principales características del Civic Hybrid es la colocación del motor eléctrico en línea con el térmico. Con esa disposición, ambos motores giran solidarios sobre el mismo cigüeñal, con lo que es más fácil agrupar sus esfuerzos y se aprovecha mejor la energía.

El motor eléctrico es solidario con el térmico y está en el lugar que ocuparía el volante del motor. El cambio es de tipo variador y no tiene ningún elemento adicional de unión al motor (embrague o convertidor hidráulico de par); es el motor eléctrico el que hace esas funciones.

2.3.3.1 Funcionamiento

Funcionalmente, hay dos diferencias notables con respecto a un Toyota Prius.

- La primera, es que el Civic Hybrid no puede comenzar la marcha desde parado únicamente con el motor eléctrico. Para que se mueva exclusivamente impulsado por el motor eléctrico, la velocidad debe estar entre unos 20 y 50 km/h y no se deben generar grandes aceleraciones.
- El motor de gasolina del Civic no deja de girar en ningún caso cuando el coche está rodando ya que el eléctrico y el de combustión van unidos solidariamente, lo que sí que hace es funcionar con un esquema de distribución donde no da retención, ni opone más resistencia al avance que el propio rozamiento de sus elementos sometidos a giro.

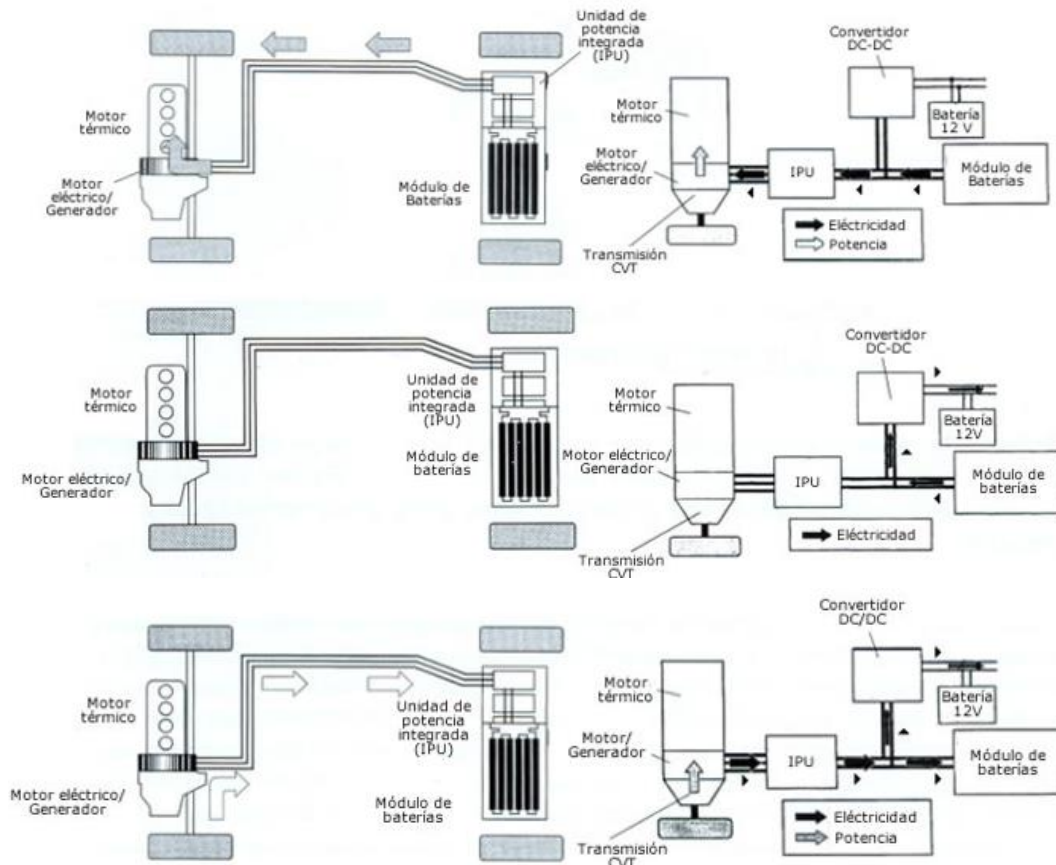


Imagen 23 Modos de funcionamiento del sistema

2.3.3.2 Motor

El motor térmico del Civic es básicamente un motor cuatro cilindros de 1,3 litros, de doble encendido secuencial con la distribución variable (VTEC) de tres fases. En este caso, las tres fases de la distribución corresponden a condiciones de funcionamiento de carga baja, carga alta o retención. Para carga baja hay unas levas que dan poca alzada a las válvulas. Para carga alta hay levas de mayor perfil, que dan más alzada. Cuando el conductor suelta el acelerador, las levas no pisan las válvulas, de manera que quedan cerradas permanentemente.

Lo que se consigue al cerrar las válvulas es que el motor no bombee aire y, por tanto, genere menor retención. Según Honda, al dejar las válvulas cerradas se disminuye la retención del motor en un 66%; en esas condiciones, el aire que queda en las cámaras se sigue comprimiendo y descomprimiendo, y se corta la inyección de combustible. Debido a que el motor ofrece menos retención, es posible utilizar mayor energía de la inercia del coche para cargar la batería



Imagen 24 Configuración del Motor del Honda Civic IMA

Este motor proporciona 95 CV de potencia máxima a 6.000 rpm y 123 Nm de par máximo a 4.500 rpm y la máxima presión media efectiva que alcanza es 11,5 bar.

2.3.3.3 Motor eléctrico

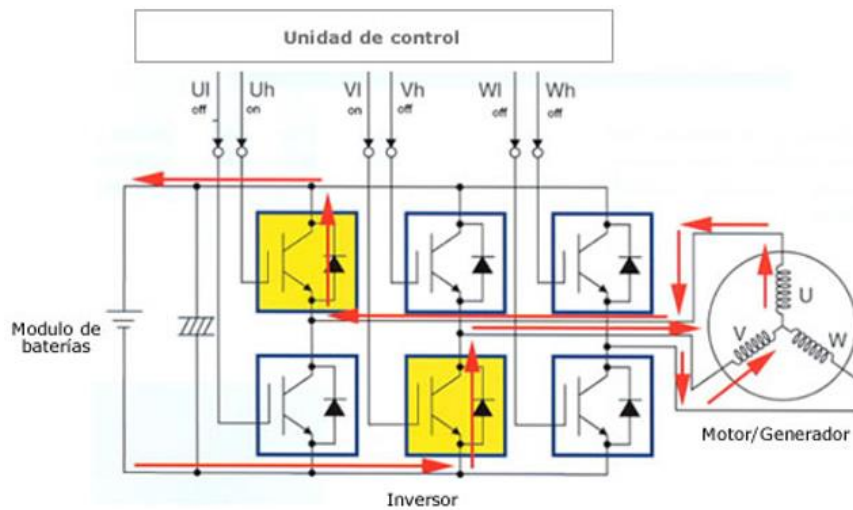


Imagen 25 Esquema del inversor del Honda Civic IMA

El motor/generador eléctrico (figura inferior) es síncrono, sin escobillas. Está compuesto de un rotor de imanes permanentes y un estator bobinado. El motor/generador es el elemento que se encarga de poner en marcha el motor térmico hasta llegar a las 1.000 rpm. También se encarga de acoplarlo nuevamente tras realizar la operación autostop, esto es, la parada automática del motor térmico. En estas ocasiones la contaminación y el consumo de combustible es prácticamente nulo, sin mencionar la baja contaminación sonora y el alto confort que esto brinda a los ocupantes del vehículo.



Imagen 26 Motor/Generador del Honda Civic IMA

En el respaldo del asiento trasero además del módulo de baterías, tenemos el sistema IPU (Unidad de Poder Integrado), donde se halla el inversor, el módulo de control de motor, el módulo convertidor de voltaje y la unidad de refrigeración.

2.3.3.4 Transmisión

El cambio es un variador continuo (CVT). Una transmisión variable continua o CVT es un tipo de transmisión semiautomática que puede cambiar la relación de cambio a

cualquier valor dentro de sus límites y según las necesidades de la marcha. La transmisión variable continua no está restringida a un pequeño número de relaciones de cambio, como las 4 a 6 relaciones delanteras de las transmisiones típicas de automóviles.



Imagen 27 Transmisión variable continua

2.3.3.5 Batería

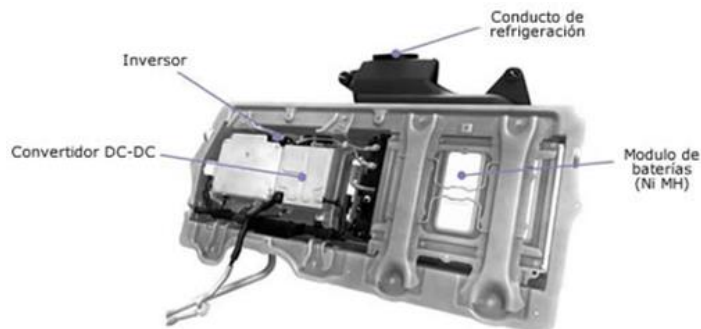


Imagen 28 Configuración de la unidad de almacenamiento de energía

La batería de Ni-MH (Níquel-Hidruro de metal) está colocada detrás del respaldo trasero y su volumen es de 59 litros. Esta batería ofrece una tensión de 158 V, y su capacidad es de 5,5 Ah.

2.3.3.6 Frenado regenerativo

El sistema IMA recupera y convierte la energía que normalmente se pierde en una desaceleración o al frenar y la acumula para asistir al motor cuando sea necesario.

Al desacelerar, el motor eléctrico actúa como generador, convirtiendo energía cinética en eléctrica que se utiliza para recargar el módulo de baterías de alta tensión. [3]

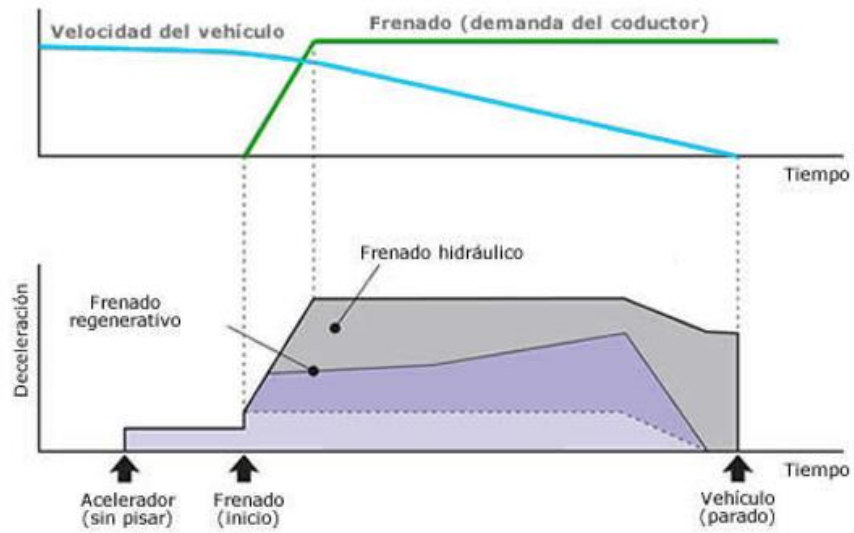


Gráfico 7 Comparativa del frenado hidráulico y el frenado regenerativo

3 DISEÑO CONCEPTUAL DEL SISTEMA

A continuación se define los modos de funcionamiento del sistema en cuestión de estudio y las características técnicas de los elementos que lo conforman:

3.1 MÉTODO DE FUNCIONAMIENTO

Para el sistema de generación de energía en cuestión se han propuesto tres modos de funcionamiento principalmente. A continuación se explica con más detalle estos modos:

3.1.1 MODO CONVENCIONAL

El modo convencional estaría activado, por defecto, durante las fases de arranque de motor, inicio de la marcha y durante la marcha.

Cuando este modo está activado, el sistema funciona como vehículo convencional con motor de combustión interna. Únicamente estaría en funcionamiento el motor de combustión, mientras que el resto de componentes del sistema (motor generador eléctrico y baterías) se mantienen inoperativos.

El motor de combustión sería quien aporta toda energía para el correcto funcionamiento del camión, y no se produciría ningún tipo de aporte, ni regeneración de energía eléctrica para su posterior uso en el sistema.

3.1.2 MODO HÍBRIDO

El modo híbrido se activaría durante la fase de marcha. A diferencia del modo convencional, aparte del motor de combustión, también estaría activo el motor generador eléctrico y el sistema de energía eléctrica.

Durante el modo híbrido el motor generador eléctrico estaría actuando como motor, funcionando paralelamente con el motor de combustión, realizando un aporte del 20% de la potencia necesaria para el desplazamiento. Por lo tanto la energía utilizada para

el desplazamiento del vehículo vendría dada tanto por el motor de combustión interna como por el sistema eléctrico, a través de la transmisión híbrida.

Siempre que el sistema de almacenamiento de energía tenga carga y el modo regenerativo se encuentre desactivado entrará en funcionamiento este modo.

3.1.3 MODO REGENERATIVO

El modo regenerativo se activaría durante la fase de frenado. Siempre que el vehículo necesite reducir su velocidad o aplicar algún frenado para el mantenimiento de la misma el sistema de regeneración estará operativo.

El sistema de motor de combustión dejaría de actuar sobre la transmisión, quedando únicamente el sistema eléctrico conectado al árbol de transmisión.

En este caso el motor generador actuaría como generador eléctrico. Al actuar de esta manera ofrecería una resistencia magnética al movimiento del vehículo, tratando de reducir su velocidad. De esta forma, al vencer esta fuerza resistiva magnética se realizaría la generación de energía eléctrica.

3.2 CÁLCULOS

A continuación se van a detallar el proceso de cálculo, junto con las hipótesis asumidas, que se han realizado para desarrollar el diseño del sistema en cuestión.

Para la realización de los cálculos se ha considerado un modelo de camión de la serie FH, del fabricante VOLVO TRUCKS. Dentro de esta serie existen muchas motorizaciones, de las cuales se ha seleccionado la D13C500. En lo que respecta el chasis, también existen diferentes modelos, de los cuales se ha considerado la configuración FH 16 4x2 Tractor. De este modelo se detallan a continuación los datos generales:

VOLVO Serie FH 16 4x2 Tractor	
Motor - D13C500	
Potencia máxima	500 CV (a 1.400-1.900 rpm)
Par máximo	2.500 Nm (a 1.050-1.400 rpm)
Emisiones	EURO 5
Nº cilindros	6
Cilindrada	12,8 dm ³

VOLVO Serie FH 16 4x2 Tractor	
Motor - D13C500	
Desplazamiento	158 mm
Diámetro	131 mm
Relación de compresión	17,8:1
Gama económica de revoluciones	1.000–1.500 rpm
CHASSIS	FH 16 4x2 Tractor
Peso en vacío	7.365 kg
Neumáticos	315/70 R22.5

Tabla 4 Características técnicas del modelo considerado en el estudio [6]

Además de lo mencionado, un factor a tener en cuenta es el neumático. Para ello se ha seleccionado una medida estándar de las siguientes características:

$$Medidas = 315/70 R22,5$$

Según la nomenclatura habitual en cuanto a neumáticos, siempre expresada en milímetros, el 315 corresponde el ancho de rodadura, mientras que el valor que aparece a continuación (70) es la relación entre el ancho y el diámetro de rodadura (D):

$$70 = \left(1 - \frac{315}{D}\right) \cdot 100$$

Por lo tanto el diámetro del neumático sería:

$$D = \frac{315}{1 - 0.7} = 1050 \text{ mm}$$

Debido a que la mayoría del tiempo de funcionamiento se realiza a una velocidad de cruce de 85 km/h, se ha considerado este valor para los cálculos que suceden a continuación:

$$85 \frac{\text{km}}{\text{h}} \cdot \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ s}} \cdot \frac{1000 \text{ m}}{1 \text{ km}} = 23,61 \text{ m/s}$$

Conociendo el diámetro de la rueda, es posible calcular la velocidad de rotación de ésta, que será la misma que la del eje que va a la transmisión:

$$w_{rueda} = \frac{v}{R} = \frac{23,61 \text{ m/s}}{\frac{1,05 \text{ m}}{2}} = 44,97 \text{ rad/s} = 429,47 \text{ rpm}$$

Una vez calculada la velocidad de rotación del eje, si se obtiene la velocidad de giro del motor para esa velocidad, se puede calcular la relación de transmisión entre la rueda y la salida del motor, para la velocidad indicada.

Se ha considerado que el motor del vehículo en cuestión, para la velocidad indicada, gira a una velocidad angular de 1150 rpm, que equivale a

$$w_{motor} = 1150 \text{ rpm} \cdot \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ rev}} \cdot \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 120,43 \text{ rad/s}$$

Por lo tanto, la relación de transmisión será

$$r_t = \frac{w_{motor}}{w_{rueda}} = \frac{120,43}{44,97} = 2,68$$

Es decir, que cada 2,68 veces que el eje del motor gire, la rueda realizará una vuelta completa.

Con la hipótesis de que el motor gira a 1150 rpm, gracias a la información que proporciona VOLVO, es posible obtener más información sobre el motor.

MOTOR D13C - EURO 5 / EEV

Potencia/Par

Valor neto según: ISO 1585, Dir. 89/491/EEC, Reglamento ECE 85

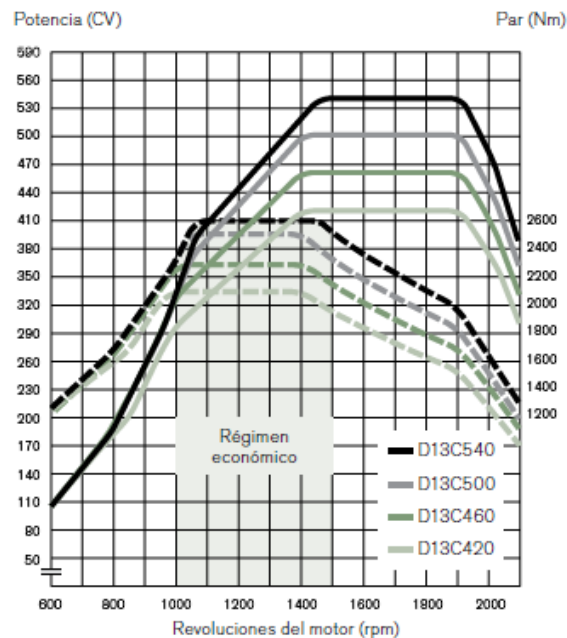


Gráfico 8 Curva de potencia del motor D13C – Euro 5 / EEV [6]

Como se puede observar en el gráfico, para las revoluciones indicadas se obtiene el siguiente par, y consecuencia se puede calcular la potencia de la siguiente manera:

$$M_{comb} = 2500 \text{ Nm}$$

$$P_{comb} = M_{comb} \cdot \omega_{motor} = 2500 \text{ Nm} \cdot 120,43 \text{ rad/s} = 301,07 \text{ kW} = 409,06 \text{ CV}$$

Como se ha mencionado anteriormente, el objetivo del presente estudio, es evaluar la posibilidad de suplir el 20% de la potencia entregada por el motor de combustión con energía eléctrica regenerada durante el propio trayecto del vehículo. De esta forma la potencia que debería generarse debería ser de

$$P_{regen} = P_{comb} \cdot 0,20 = 301,07 \text{ kW} \cdot 0,20 = \mathbf{60,21 \text{ kW}}$$

Para los cálculos que se suceden a este apartado, ha sido considerado el 90% del total de la masa máxima permitida del conjunto, es decir

$$40.000 \text{ kg} \cdot 0,90 = \mathbf{36.000 \text{ kg}}$$

3.2.1 PRINCIPIO FÍSICO

Para realizar la evaluación de viabilidad del sistema se ha considerado simular dos rutas reales que realiza una compañía de transporte de forma continua.

El principio en el que se basa este sistema es en de la conservación de la energía, que para el caso de estudio en cuestión, considerándolo ideal, se traduce como:

$$E_{potencial} = E_{cinética}$$

El sistema de generación debería de absorber toda la energía durante los tramos de desnivel negativo, es decir, durante las bajadas. Toda la aceleración que sufriría el camión durante el descenso la aprovecharía el generador de energía, ofreciendo una resistencia al vehículo para que este se mantenga a una velocidad considerada, que al vencerla generaría energía eléctrica. Es decir, que toda la energía potencial que pierde el camión al ir perdiendo altura se convertiría en energía cinética para el sistema regenerativo.

$$E_{cinética} = E_{potencial} = m \cdot g \cdot h$$

Donde,

m = *masa total del vehículo*

$g = \text{gravedad}$

$h = \text{diferencia de altura entre inicio y final de tramo}$

A este punto debería de añadirse las pérdidas que surgirán del desgaste de los elementos y las propias debido al propio desplazamiento del vehículo. El cálculo de éstas se detalla en los puntos que suceden a continuación.

3.2.2 MODELIZACIÓN DE RUTAS

Para realizar dicha modelización se han considerado dos rutas que realiza una empresa logística de manera diaria que se detalla a continuación:

	Ruta BM	Ruta BZ
Inicio	RIO LOGISTIC, S.L. Calle Vilar d'Abdelà, 2-4, 08170 Montornès del Vallès, Barcelona	
Destino	PALIBEX LOGÍSTICA, S.L.U. Calle Montejo, 4, 28021 Madrid	GRUPO TRANSAHER Autovía de Huesca, km 7,6 , 50820 San Juan de Mozarrifar, Zaragoza
Distancia	637 km	315 km
Frecuencia	Ida un día y vuelta al día siguiente	Ida y vuelta en el mismo día

Tabla 5 Características de las rutas consideradas para el estudio

Para ello se ha realizado la modelización de ambas rutas, obteniendo los desniveles por tramos y calculando la variación de energía potencial, y potencia, para cada uno de éstos.

- OBTENCIÓN DEL GRÁFICO INICIAL

Para la obtención del gráfico de altura se ha utilizado la página web entremontanas.com.

Con esta herramienta es posible obtener, introduciendo las direcciones correspondientes, la altura a lo largo de toda la ruta.

En este gráfico se observa la altura en el eje vertical a lo largo de la distancia de la ruta, que es el eje horizontal. La altura está tomada de kilómetro en kilómetro.

Obteniendo el gráfico que se muestra a continuación:

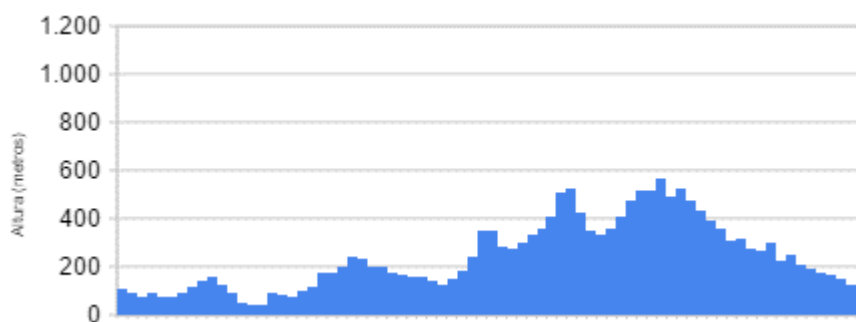


Gráfico 9 Ejemplo de diagrama de alturas para una ruta

- **CALCULAR GRÁFICAMENTE LA DISTANCIA ENTRE LOS PUNTOS RELEVANTES**

Esta herramienta no ofrece la distancia a la que se encuentra cada uno de los puntos en la ruta. Debido a esto se ha tenido que realizar una acotación mediante una herramienta de CAD, en este caso AUTOCAD 2013.

Se ha introducido la imagen de la gráfica (con los puntos de interés ya situados). Tras esto se ha escalado esta imagen considerando que el punto inicial y el punto final debían estar a la distancia que se indica en la tabla 5.

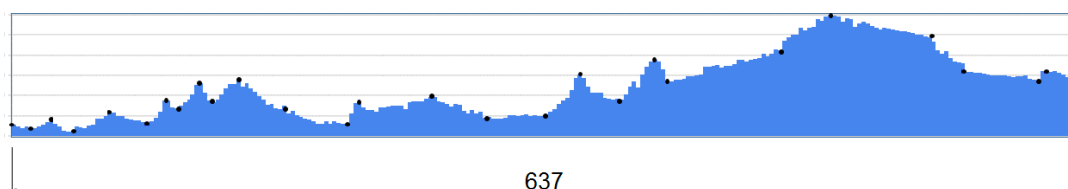


Gráfico 10 Situación de los puntos más relevantes

A partir de aquí ya se puede ir acotando punto a punto hasta obtener la distancia de todos los tramos.

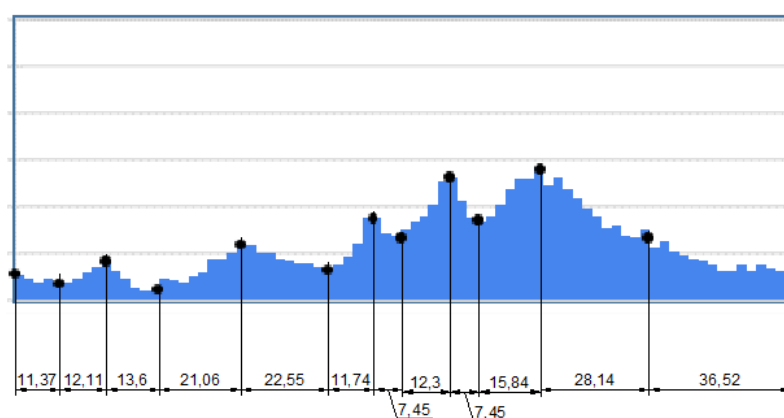


Gráfico 11 Acotación de la distancia entre los puntos más relevantes

- REPRESENTACIÓN GRÁFICA DE LA CURVA MODELIZADA

Al llegar a este punto ya se han obtenido, previamente, los puntos más relevantes de la gráfica, la altura a la que está situado cada uno de estos puntos y la distancia de los mismos.

Con todos estos datos se procede a graficar el modelo obtenido:

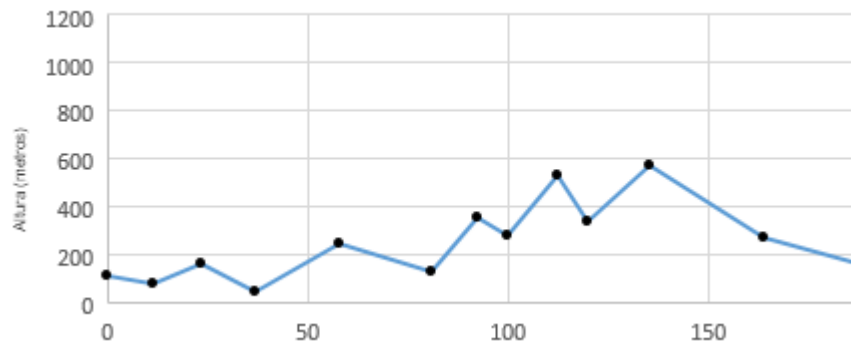


Gráfico 12 Ejemplo de curva modelizada

Como comprobación se superponen las dos gráficas, observando así la aproximación del modelo a la realidad:

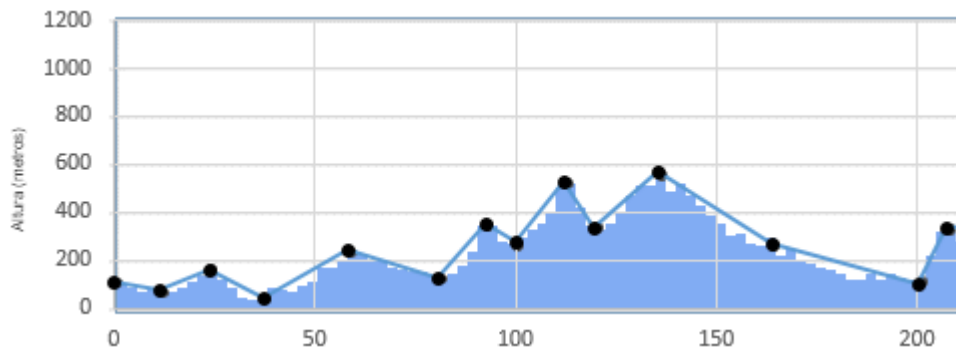
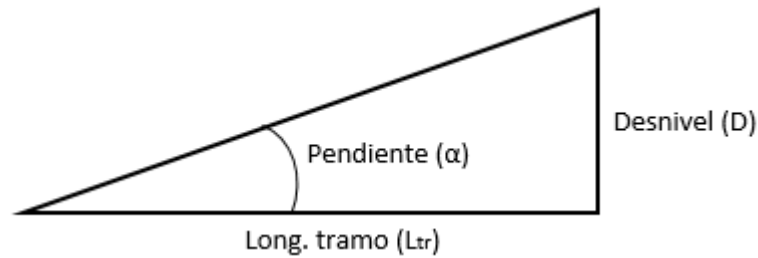


Gráfico 13 Comprobación de la aproximación entre modelo y real

Una vez se ha obtenido esta recta modelizada se procede a calcular la distancia lineal que hay entre cada punto (tramo) y la diferencia de altura entre cada uno de los punto consecutivos.

De esta forma, llegado a este punto, se ha obtenido la longitud y el desnivel de cada uno de los tramos. Un factor muy importante será el ángulo, que se obtendrá a partir de las magnitudes mencionadas.



$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{D}{L_{tr}} \right)$$

La pendiente es el ángulo medio que tiene la calzada por la que circula el vehículo en cuestión de estudio. Este factor será de los más influyentes, ya que será una de las pocas variables que irá cambiando a lo largo del recorrido y determinará la cantidad de energía que se puede llegar a almacenar, como se detalla más adelante.

Los resultados obtenidos son los que se muestran a continuación. En ellos se puede observar el resultado de los modelos realizados y si aproximación a las gráficas de altitud extraídas:

Modelo de la ruta BZ

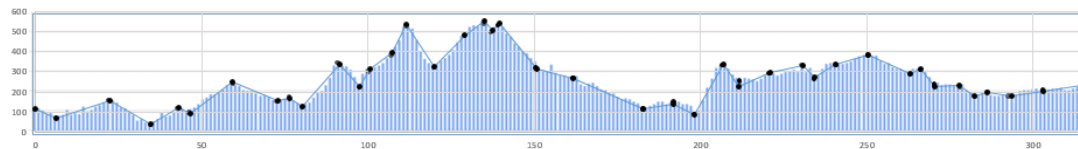


Gráfico 14 Modelo resultado de la ruta BZ

Modelo de la ruta BM

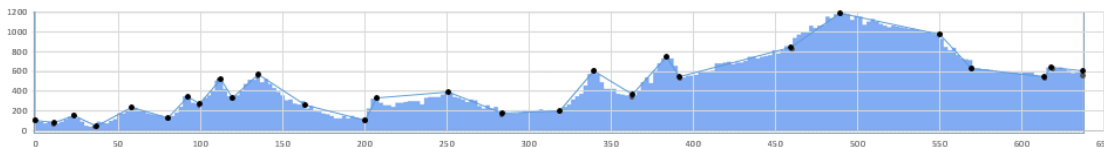


Gráfico 15 Modelo resultado de la ruta BM

Y las coordenadas para cada uno de los puntos se detallan a continuación, indicando la altura de cada uno de ellos, junto con la longitud en el tramo en el que se encuentran. Además se indica también la longitud de cada uno de los tramos y el ángulo de desnivel que tienen.

Características de la ruta BZ

Ruta BZ					
Tramo	Altura [m]	Distancia [km]	Dist. Entre puntos [km]	Desnivel [m]	Ángulo [rad]
-	115,91	0,00	-	-	-
T1	68,57	6,15	6,15	-47,34	-0,0077
T2	156,55	22,35	16,20	87,99	0,0054
T3	39,88	34,66	12,31	-116,67	-0,0095
T4	121,44	42,95	8,29	81,56	0,0098
T5	94,85	46,47	3,52	-26,59	-0,0076
T6	247,76	59,03	12,56	152,91	0,0122
T7	156,23	72,97	13,94	-91,53	-0,0066
T8	169,95	76,36	3,39	13,72	0,0040
T9	127,23	80,13	3,77	-42,72	-0,0113
T10	340,55	91,31	11,18	213,31	0,0191
T11	226,77	97,34	6,03	-113,78	-0,0189
T12	313,42	100,48	3,14	86,64	0,0276
T13	394,21	107,39	6,91	80,80	0,0117
T14	534,27	111,41	4,02	140,06	0,0348
T15	326,07	119,84	8,43	-208,20	-0,0247
T16	485,15	129,16	9,32	159,08	0,0171
T17	553,52	134,95	5,79	68,37	0,0118
T18	508,87	137,34	2,39	-44,65	-0,0187
T19	544,41	139,48	2,14	35,54	0,0166
T20	316,87	150,81	11,33	-227,54	-0,0201
T21	265,94	161,76	10,95	-50,93	-0,0047

Ruta BZ					
Tramo	Altura [m]	Distancia [km]	Dist. Entre puntos [km]	Desnivel [m]	Ángulo [rad]
T22	117,72	182,65	20,89	-148,22	-0,0071
T23	141,71	191,77	9,12	23,99	0,0026
T24	86,87	198,07	6,30	-54,84	-0,0087
T25	335,81	207,02	8,95	248,94	0,0278
T26	225,63	211,56	4,54	-110,18	-0,0243
T27	298,65	220,89	9,33	73,02	0,0078
T28	334,68	230,60	9,71	36,04	0,0037
T29	272,32	234,13	3,53	-62,36	-0,0177
T30	337,85	240,68	6,55	65,53	0,0100
T31	381,88	250,26	9,58	44,03	0,0046
T32	293,77	262,99	12,73	-88,10	-0,0069
T33	311,61	266,14	3,15	17,84	0,0057
T34	227,47	270,43	4,29	-84,14	-0,0196
T35	235,05	277,87	7,44	7,57	0,0010
T36	179,51	282,25	4,38	-55,53	-0,0127
T37	196,69	286,04	3,79	17,18	0,0045
T38	180,11	293,37	7,33	-16,58	-0,0023
T39	205,68	303,10	9,73	25,57	0,0026
T40	233,67	314,59	11,49	27,99	0,0024

Tabla 6 Características de la ruta BZ

Características de la ruta BM

Ruta BM					
Tramo	Altura [m]	Distancia [km]	Dist. Entre puntos [km]	Desnivel [m]	Ángulo [rad]
-	109,67	0,00	-	-	-
T1	76,62	11,37	11,37	-33,05	-0,0029
T2	157,52	23,48	12,11	80,90	0,0067
T3	45,54	37,08	13,60	-111,98	-0,0082
T4	239,39	58,14	21,06	193,85	0,0092
T5	123,71	80,69	22,55	-115,69	-0,0051
T6	348,33	92,43	11,74	224,62	0,0191
T7	274,08	99,88	7,45	-74,25	-0,0100
T8	526,49	112,18	12,30	252,41	0,0205
T9	332,61	119,63	7,45	-193,87	-0,0260
T10	569,43	135,47	15,84	236,82	0,0149
T11	264,18	163,61	28,14	-305,25	-0,0108
T12	101,56	200,13	36,52	-162,62	-0,0045
T13	334,49	207,41	7,28	232,93	0,0320
T14	386,16	250,88	43,47	51,67	0,0012
T15	180,45	283,53	32,65	-205,71	-0,0063
T16	198,44	318,52	34,99	17,98	0,0005
T17	608,28	339,50	20,98	409,84	0,0195
T18	362,36	362,92	23,42	-245,92	-0,0105
T19	746,35	383,49	20,57	383,99	0,0187
T20	545,42	391,58	8,09	-200,93	-0,0248
T21	848,93	459,24	67,66	303,51	0,0045
T22	1196,16	489,55	30,31	347,23	0,0115

Ruta BM					
Tramo	Altura [m]	Distancia [km]	Dist. Entre puntos [km]	Desnivel [m]	Ángulo [rad]
T23	974,77	550,03	60,48	-221,39	-0,0037
T24	635,73	569,23	19,20	-339,04	-0,0177
T25	552,79	613,87	44,64	-82,94	-0,0019
T26	643,87	618,19	4,32	91,08	0,0211
T27	607,80	637,39	19,20	-36,07	-0,0019

Tabla 7 Características de la ruta BM

3.2.3 DINÁMICA DEL VEHÍCULO

Debido a que el este estudio pretende realizar una aproximación real en el cálculo de energías, para evaluar la viabilidad de un sistema de regeneración de energía, se han considerado las fuerzas que actúan durante el desplazamiento del conjunto.

La figura aparece a continuación muestra las fuerzas que actúan sobre un vehículo que se desplaza por una pendiente. El esfuerzo de tracción, F_t , en la zona de contacto entre los neumáticos de las ruedas motrices y la superficie de la carretera propulsa el vehículo hacia delante. Esto es producido por el par de la unidad de potencia y es transferido a través de la transmisión y el accionamiento final a las ruedas motrices. Mientras el vehículo se mueve, existe una resistencia que se opone a su movimiento. La resistencia por lo general incluye la resistencia a la rodadura del neumático, la resistencia aerodinámica y la resistencia de la propia pendiente. Según la segunda ley de Newton, la aceleración del vehículo se puede escribir como

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\Sigma F_t - \Sigma F_{tr}}{\delta M_v}$$

Donde V es la velocidad del vehículo, ΣF_t , es el total de la fuerza de tracción sobre el vehículo, ΣF_{tr} , es la fuerza de resistencia total, M_v es la masa total del conjunto vehículo, y δ es el factor de masa, que es un efecto del giro de los componentes en el tren de potencia

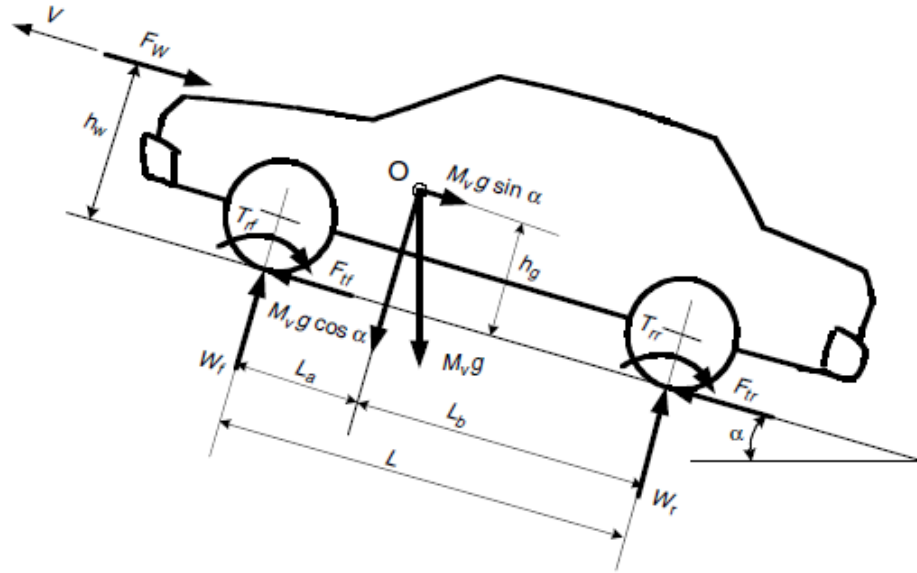


Imagen 29 Fuerzas sobre el vehículo durante el desplazamiento [7]

Como se observa en la anterior ecuación, la aceleración y la velocidad dependen del esfuerzo de tracción, la resistencia y la masa del vehículo. [7]

3.2.3.1 Resistencia del vehículo

Como se ha observado en la imagen anterior, la resistencia que sufre el vehículo y se impone a su movimiento, incluye la resistencia de rodadura de los neumáticos como el par T_{rf} y T_{rr} , la fuerza aerodinámica F_w y la resistencia a la pendiente con el término $M_v \cdot g \cdot \sin \alpha$. A continuación se detallan cada una de estas fuerzas que interviene.

- Resistencia de rodadura

La resistencia a la rodadura de las ruedas en superficies duras es causada principalmente por la histéresis en los materiales del neumático. Esto es debido a la flexión de la carcasa mientras el neumático está rodando. La histéresis causa una distribución asimétrica de las fuerzas de reacción del suelo. La presión en la mitad delantera del área de contacto es mayor que en la mitad posterior, como se muestra en la siguiente imagen (a). Este fenómeno da lugar a que la fuerza de reacción del suelo se desplace hacia delante. Esta fuerza de reacción hacia el suelo desplazada hacia delante, con la carga normal que actúa sobre el centro de la rueda, crea un momento, que se opone a la rodadura de la rueda. En superficies blandas, la resistencia a la rodadura se debe principalmente a la deformación de la superficie del suelo como se muestra en la imagen (b) que aparece a continuación. La fuerza de

reacción del suelo se desplaza prácticamente de manera completa hacia la mitad delantera.

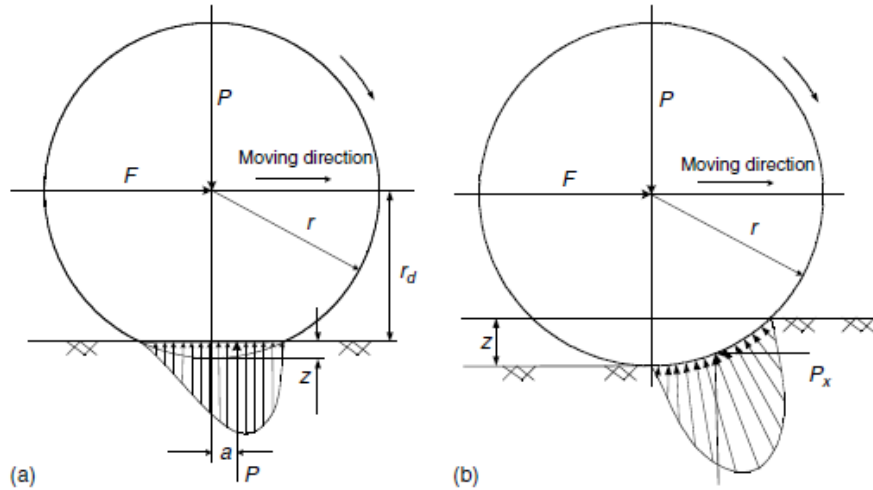


Imagen 30 Fuerzas sobre el neumático en un medio duro (a) y uno blando (b) [7]

El momento producido por el desplazamiento hacia delante de la fuerza de reacción resultante se denomina momento de resistencia a la rodadura, como se muestra en la imagen anterior (a), y puede expresarse como

$$T_r = P \cdot a$$

Para mantener la rueda en movimiento, se requiere una fuerza F , que actúe sobre el centro de las ruedas, para equilibrar este momento resistente a la rodadura. Esta fuerza se expresa como

$$F = \frac{T_r}{r_d} = \frac{P \cdot a}{r_d} = P \cdot f_r$$

Donde r_d es el radio efectivo del neumático y $f_r = a/r_d$ es el coeficiente de resistencia a la rodadura. De esta manera, el momento resistente a la rodadura puede sustituirse de forma equivalente por una fuerza horizontal que actúa sobre el centro de la rueda en la dirección opuesta al movimiento de la rueda. Esta fuerza equivalente se llama resistencia a la rodadura con una magnitud de

$$F_r = P \cdot f_r$$

Donde P es la carga normal, actuando sobre el centro de la rueda de giro. Cuando se acciona un vehículo en una carretera de pendiente, la carga normal, P , debe ser

reemplazada por el componente, que es perpendicular a la superficie de la carretera. Es decir,

$$F_r = P \cdot f_r \cdot \cos \alpha$$

Donde α es el pendiente de la calzada.

El coeficiente de resistencia a la rodadura, f_r , es función del material del neumático, la estructura del neumático, la temperatura de los neumáticos, la presión de inflado de los neumáticos, la geometría de la banda de rodadura, la rugosidad del camino, el material de carretera y la presencia o ausencia de líquidos en la carretera. Los valores típicos de los coeficientes de resistencia a la rodadura en varios caminos se dan en la tabla que se muestra a continuación. Los valores dados en ésta no tienen en cuenta sus variaciones con la velocidad. Basándose en los resultados experimentales, se han propuesto muchas fórmulas empíricas para calcular la resistencia a la rodadura sobre una superficie dura.[7]

Rolling Resistance Coefficients	
Conditions	Rolling resistance coefficient
Car tires on concrete or asphalt	0.013
Car tires on rolled gravel	0.02
Tar macadam	0.025
Unpaved road	0.05
Field	0.1–0.35
Truck tires on concrete or asphalt	0.006–0.01
Wheels on rail	0.001–0.002

Tabla 8 Coeficientes de resistencia a la rodadura [7]

Para el presente estudio se ha considerado la siguiente ecuación para el cálculo del coeficiente de resistencia a la rodadura [7]:

$$f_r = f_0 + f_s \left(\frac{V}{100} \right)^{2,5}$$

Donde V es la velocidad del vehículo en km/h, y los factores f_0 y f_r dependen de la presión de inflado del neumático.

En el cálculo del rendimiento del vehículo, se puede considerar el coeficiente de resistencia a la rodadura como una función lineal de la velocidad. Para la gama más común de presión de inflado, se puede utilizar la siguiente ecuación para el tipo de vehículo en cuestión de estudio:

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{V}{100} \right)$$

Considerando que la velocidad se ha determinado constante a 85 km/h, se obtiene el siguiente coeficiente de resistencia a la rodadura para ambas rutas:

$$f_r = 0,01 \left(1 + \frac{85}{100} \right) = 0,0185$$

Conociendo este coeficiente se procede a calcular las perdidas debido a la resistencia que opone la rodadura en cada uno de los tramos, en cada ruta, mediante la ecuación definida anteriormente:

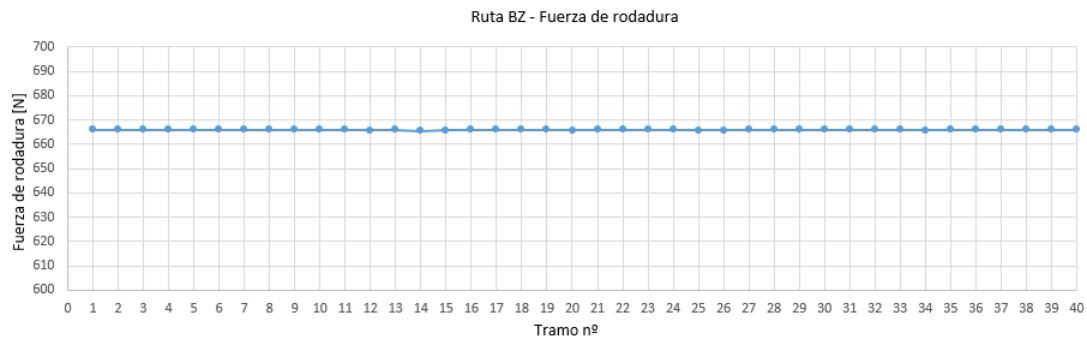


Gráfico 16 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BZ.

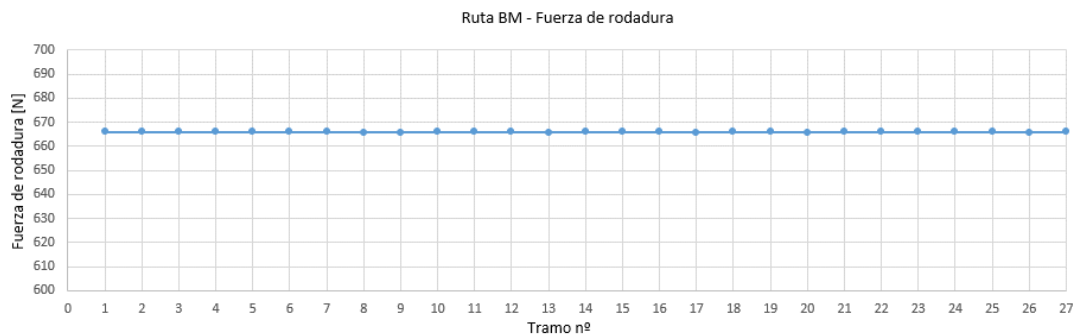


Gráfico 17 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BM.

Se puede observar que prácticamente se mantiene el valor constante para ambas rutas y en cada uno de los tramos, manteniéndose siempre sobre los 667N aproximadamente. Esta poca variación es debido a que la variación de pendiente a lo largo de ambas rutas es pequeña, y en lo que a esta resistencia respecta la afectación es pequeña.

- Resistencia aerodinámica

Un vehículo que viaja a una velocidad particular en el aire encuentra una fuerza que se opone a su desplazamiento. Esta fuerza se conoce como resistencia aerodinámica. Resulta principalmente de dos componentes: *Shape Drag* (resistencia de forma) y *Skin Friction* (fricción superficial).

Shape Drag: El movimiento hacia adelante del vehículo empuja el aire en la misma dirección. Sin embargo, el aire no puede retirarse a su paso de manera instantánea y su presión se incrementa así, dando como resultado un incremento de la presión en la zona frontal. Además, el aire detrás del vehículo no puede situarse instantáneamente en el espacio dejado por el movimiento hacia delante. Esto crea una zona de baja presión de aire en la zona posterior. Por lo tanto, el movimiento ha creado dos zonas de presión que se oponen al movimiento del vehículo como se muestra en la imagen 31. La fuerza resultante en el vehículo es el *Shape Drag*.

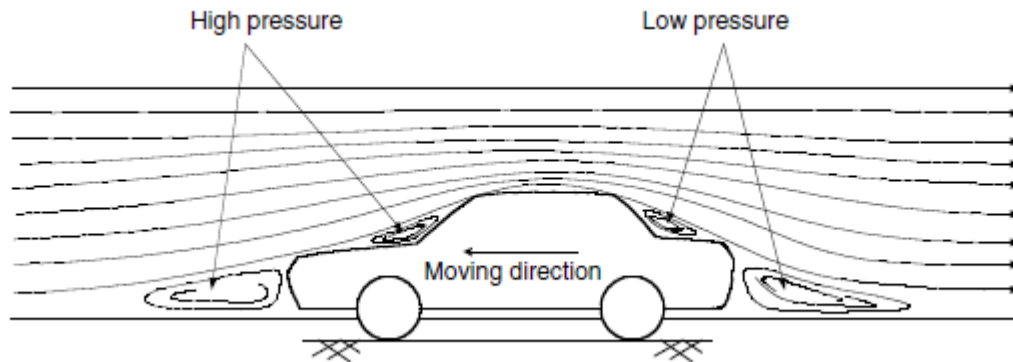


Imagen 31 Shape drag [7]

Skin Friction: El aire cerca de la superficie del vehículo se mueve prácticamente a la velocidad del vehículo mientras el aire más alejado del vehículo permanece inmóvil. En medio, las moléculas de aire se mueven a una amplia gama de velocidades. La diferencia de velocidad entre dos moléculas de aire produce una fricción que resulta ser el segundo componente de la resistencia aerodinámica.

La resistencia aerodinámica es función de la velocidad V del vehículo, del área frontal del vehículo A_f , de la forma del vehículo y de la densidad del aire ρ . La resistencia aerodinámica se expresa como

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A_f \cdot C_D \cdot (V + V_w)^2$$

Donde C_D es el coeficiente de resistencia aerodinámica que caracteriza la forma del vehículo y V_w es la componente de la velocidad del viento en la dirección de movimiento del vehículo, que tiene un signo positivo cuando este componente es opuesto a la velocidad del vehículo y un signo negativo cuando está en la misma dirección en la que se desplaza el vehículo. Los coeficientes aerodinámicos de arrastre para algunos tipos de formas de carrocerías de vehículos se muestran en la siguiente tabla:

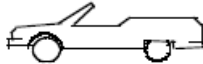
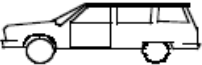





Vehicle Type	Coefficient of Aerodynamic Resistance
 Open convertible	0.5–0.7
 Van body	0.5–0.7
 Ponton body	0.4–0.55
 Wedge-shaped body; headlamps and bumpers are integrated into the body, covered underbody, optimized cooling air flow	0.3–0.4
 Headlamp and all wheels in body, covered underbody	0.2–0.25
 K-shaped (small breakway section)	0.23
 Optimum streamlined design	0.15–0.20
Trucks, road trains	0.8–1.5
Buses	0.6–0.7
Streamlined buses	0.3–0.4
Motorcycles	0.6–0.7

Tabla 9 Coeficientes de resistencia aerodinámica para cada tipo de vehículo [7]

Para el cálculo de la resistencia aerodinámica, se ha tomado $C_D = 0,8$, como indica en la tabla. En el caso de la densidad del aire se ha considerado condiciones normales (25° C y 1 atm) con lo que el valor tomado ha sido $\rho = 1,100 \text{ kg/m}^3$. Por último, según se puede observar en los anexos, el área frontal del camión considerado es de

$$A_f = 3,87 \text{ m} \cdot 2,50 \text{ m} = 9,66 \text{ m}^2$$

La velocidad del viento se ha considerado $V_w = 0 \text{ m/s}$.

Con estos valores se ha procedido al cálculo de la resistencia aerodinámica en cada uno de los tramos para las dos rutas definidas. Debido a que todos los valores de la ecuación se mantienen constantes, la resistencia aerodinámica también será considerada constante en todos los puntos con el valor siguiente:

$$F_w = \frac{1}{2} \cdot 1,1 \frac{kg}{m^3} \cdot 9,66 m^2 \cdot 0,8 \cdot \left(23,61 \frac{m}{s} + 0 \right)^2 = 2368,47 N$$

- Resistencia a la pendiente

Cuando un vehículo asciende o desciende una pendiente, su peso produce un componente, que siempre está dirigido hacia abajo, como se muestra en la imagen siguiente. Este componente se opone al movimiento hacia adelante (pendiente ascendente) o favorece el movimiento hacia adelante (pendiente descendente). En el análisis, sólo se considera la fuerza que sucede cuesta arriba y se opone al desplazamiento, ya que la de bajada se ha considerado al calcular la variación de energía. Esta fuerza durante la pendiente se denomina resistencia a la pendiente.

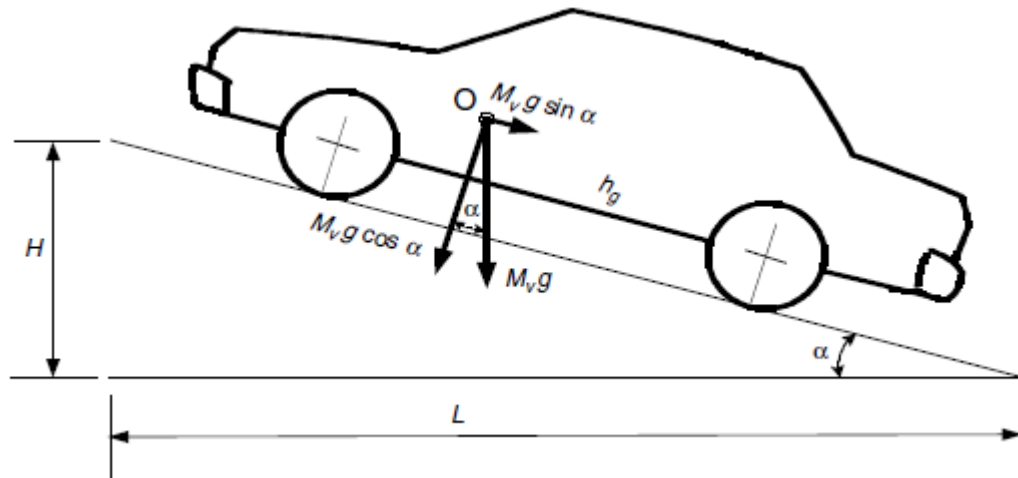


Imagen 32 Conjunto de fuerzas que actúan sobre el vehículo en una pendiente

La resistencia a la pendiente, de la imagen anterior, puede expresarse como

$$F_g = M_v \cdot g \cdot \sin \alpha$$

Todos los valores que aparecen en la ecuación ya se han obtenido previamente, con lo que los resultados para cada uno de los tramos en cada ruta son los siguientes:

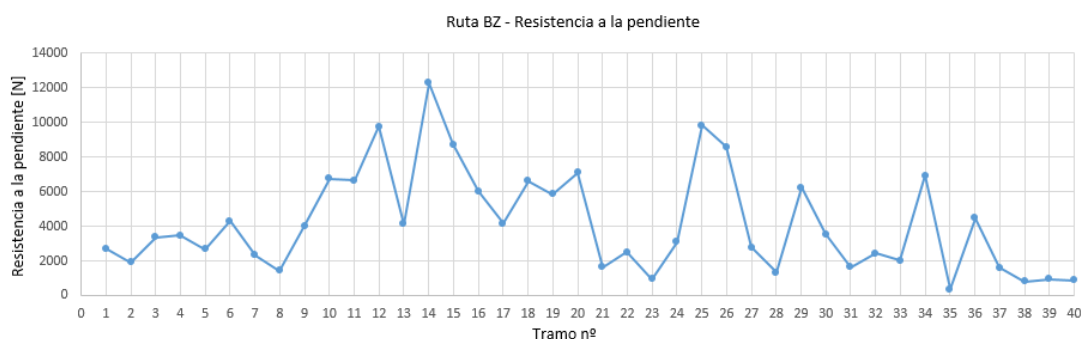


Gráfico 18 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BZ.

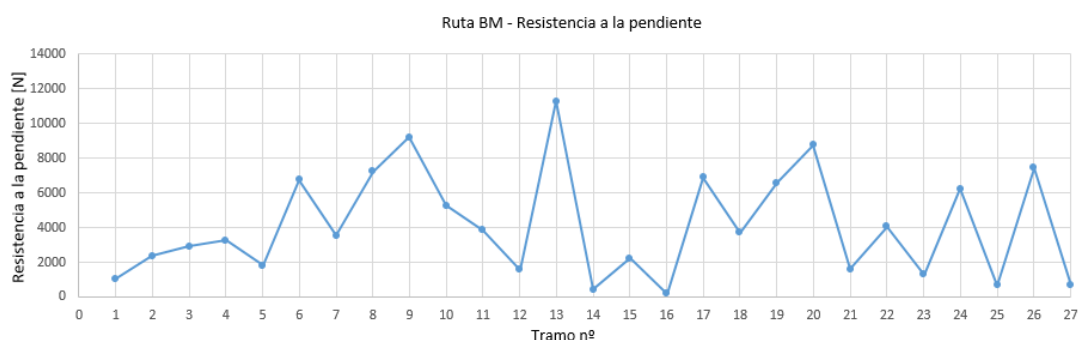


Gráfico 19 Fuerza de rodadura a lo largo de la ruta BM.

A diferencia de la Fuerza de rodadura, en este caso la variación es muy grande. Esta gran fluctuación es debido a que el factor masa está multiplicando la ecuación, con lo que una pequeña variación de ángulo genera que la fuerza aumente o disminuya de manera considerable, como se observa en los resultados obtenidos.

Todas las fuerzas calculadas para cada uno de los puntos actuarán cuando ese tramo esté actuando como pendiente positiva, ya que, como se ha dicho anteriormente, para las bajadas ésta no ejerce como resistencia sino que favorece el movimiento. En el caso de las bajadas se tiene en cuenta en el cálculo de la variación de energía.

3.2.3.2 Ecuación dinámica

En la dirección longitudinal, las fuerzas externas principales que actúan sobre un vehículo de dos ejes, incluyen la resistencia a la rodadura de los neumáticos, que está representado por la componente F_r , el arrastre aerodinámico F_w , la resistencia a la pendiente F_g ($M_v g \sin \alpha$) y esfuerzo de tracción de los neumáticos delanteros y traseros, F_{tf} y F_{tr} . F_{tf} es cero para un vehículo con tracción trasera, mientras que F_{tr} es cero para un vehículo con tracción delantera.

La ecuación dinámica del movimiento del vehículo a lo largo de la dirección longitudinal se expresa como

$$M_v \cdot \frac{dV}{dt} = (F_{tf} + F_{tr}) - (F_r + F_w + F_g)$$

Donde dV/dt es la aceleración lineal del vehículo a lo largo de su dirección longitudinal, y M_v es la masa total del vehículo. El primer término, situado en el lado derecho de la ecuación, es la fuerza de tracción total y el segundo término es la resistencia que se opone al movimiento.

En el caso en cuestión de estudio se evalúa durante un trayecto para el cual se ha considerado una velocidad constante de 85 km/h, con lo que la aceleración a lo largo de las rutas propuestas será igual a cero, quedando la ecuación de la siguiente manera.

$$M_v \cdot 0 = (F_{tf} + 0) - (F_r + F_w + F_g)$$

$$F_{tf} = F_r + F_w + F_g$$

Con los resultados obtenidos en los apartados anteriores para cada una de las fuerzas de resistencia calculadas se ha calculado la fuerza de tracción F_{tf} que sería necesaria en cada uno de los tramos para mantener la velocidad mencionada anteriormente de manera constante.

A continuación se muestra la fuerza total cuando los tramos actúan como bajada, distinguiendo la parte que aporta cada una de las fuerzas:

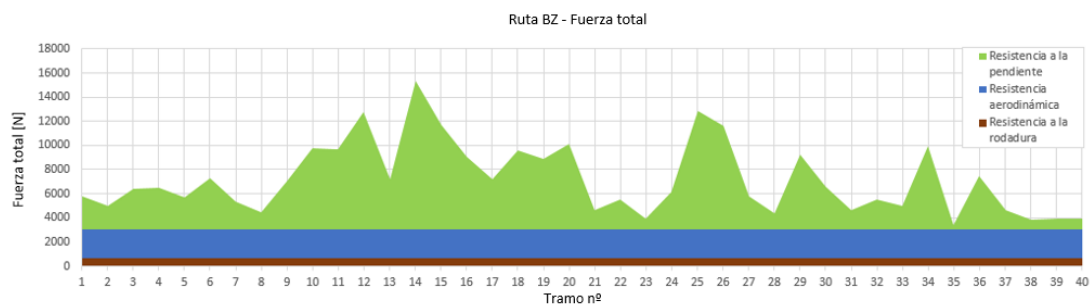


Gráfico 20 Fuerza total a lo largo de la ruta BZ.

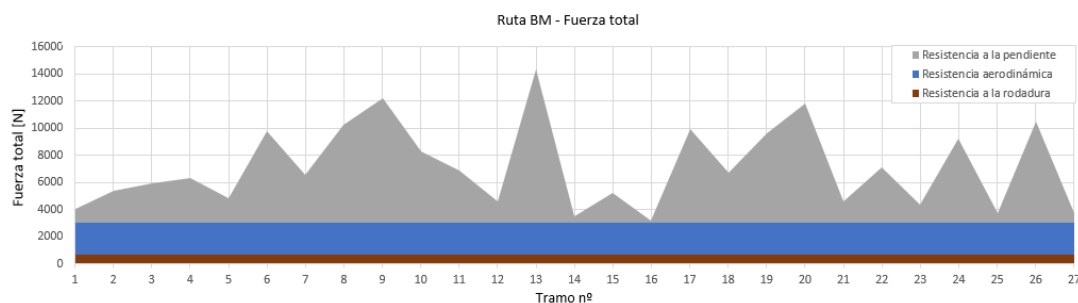


Gráfico 21 Fuerza total a lo largo de la ruta BM.

3.2.3.3 Cálculo del par resistivo en las subidas

Durante las fases de ascenso es necesario conocer el par que tendría que suministrar la unidad de potencia al vehículo para poder mantener constante la velocidad establecida. Junto con los valores obtenidos del punto anterior, a partir de los resultados que también se obtengan en este apartado se procederá con el dimensionado del motor/generador del que se compondrá el sistema propuesto.

Durante las fases de subida todas las fuerzas definidas anteriormente actuarían en contra del desplazamiento del vehículo, suponiendo una resistencia contra este.

Con el total de las fuerzas que se oponen al desplazamiento longitudinal, y conociendo el diámetro del neumático, se puede obtener el par de tracción que deberá aplicarse para vencer las fuerzas resistivas con la siguiente expresión:

$$T_{tf_i} = F_{tf_i} \cdot \frac{D}{2} = (F_{r_i} + F_{w_i} + F_{g_i}) \cdot \frac{D}{2}$$

A continuación se muestra el resultado del par que se opone al giro de la rueda y que debería ser vencido para mantener la velocidad constante:



Gráfico 22 Par resistivo total en subida de la ruta BZ.

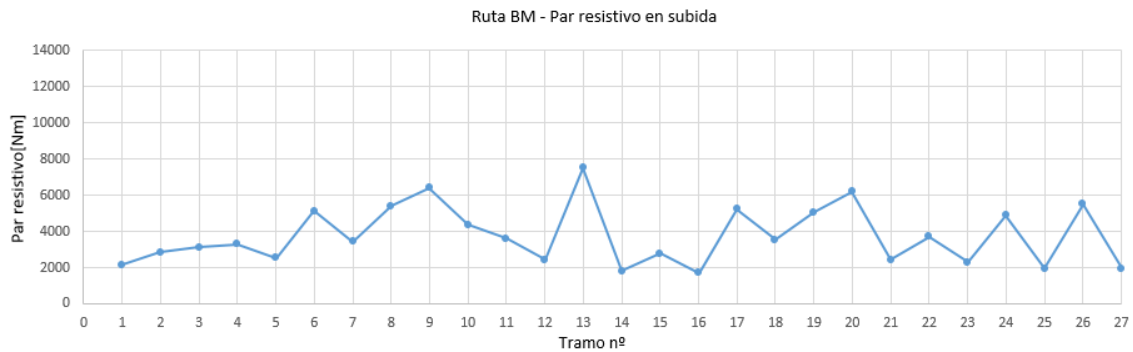


Gráfico 23 Par resistivo total en subida de la ruta BM.

Se puede observar que la forma de ambas gráficas es la misma que se ha obtenido en la fuerza total, situadas en valores diferentes debido a

3.2.3.4 Cálculo de variación de energía en bajada

Es importante remarcar que en el cálculo de energías se ha distinguido cuando el tramo actúa como subida, y cuando actúa como bajada. Es decir, cualquier tramo que durante la ida sea una bajada, en la vuelta al punto de origen, será una subida, y viceversa. Es por este motivo que todos los tramos se han considerado como subida y como bajada.

Una vez modelizada la ruta con todos los parámetros necesarios para cada uno de los tramos se procede al cálculo de la variación de energía en cada uno de ellos, obteniendo así la energía que hasta la actualidad se está disipando en forma de calor, y que con el presente estudio se pretende aprovechar para la generación de energía eléctrica.

El cálculo de la variación de energía potencial ha realizado tramo a tramo. Inicialmente, para la evaluación de la variación de energía potencial se ha aplicado la siguiente fórmula:

$$E_{potencial_i} = m \cdot g \cdot h_i$$

Donde,

$$E_{potencial_i} = \text{variación de energía potencial en el tramo } i$$

$$h_i = \text{diferencia de altura en el tramo } i$$

Idealmente, durante las bajadas, toda la energía potencial que se convierte en energía cinética sería absorbida por el sistema de generación de energía eléctrica. Esto únicamente sucedería en un entorno ideal, donde los sistemas no tuvieran ningún tipo

de pérdida de energía. Es por ello que, a partir de las fuerzas que se han calculado en el apartado anterior, se ha determinado la cantidad de energía que se podría aprovechar para que el sistema propuesto la almacene.

Existen ciertas fuerzas de las calculadas en el apartado anterior que se oponen al movimiento durante descenso, que es el momento en el que se produce la generación. Estas fuerzas son la aerodinámica, ya que durante el ascenso y el descenso actuaría de la misma manera; la resistencia de rodadura, que al igual que la aerodinámica, actuaría oponiéndose al movimiento tanto en la subida como en la bajada. En el caso del descenso, la resistencia a la pendiente no actuaría como tal, sino que favorecería el movimiento del vehículo. Esto es debido a que al cambiar el ángulo de la calzada, la componente paralela al asfalto en vez de ir en contra del desplazamiento, se sitúa en la misma dirección y sentido, favoreciéndolo.

Finalmente la energía que se podría almacenar en el sistema en cuestión de estudio se expresaría de la siguiente manera

$$E_{generada_i} = E_{potencial_i} - E_{pérdidas_i}$$

Siendo

$$E_{pérdidas_i} = L_i \cdot (F_{r_i} + F_{w_i})$$

Donde

L_i = distancia recorrida en el tramo

A continuación se muestran los gráficos para cada una de las rutas de la energía perdida. En el gráfico se detalla que parte de la cantidad que se ha disipado corresponde a pérdidas aerodinámicas y que parte corresponde a pérdidas por la resistencia a la rodadura:

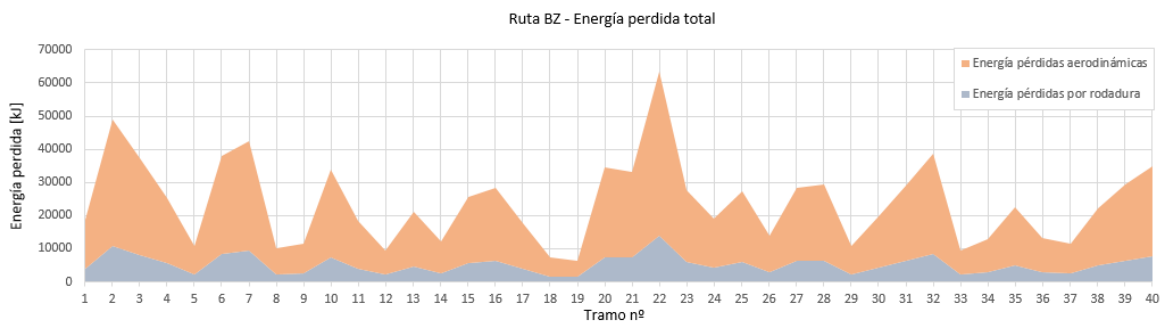


Gráfico 24 Energía perdida total en la ruta BZ

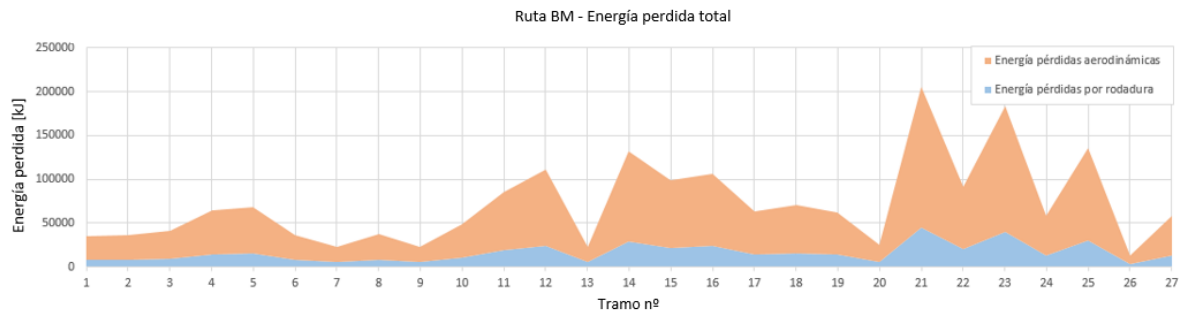


Gráfico 25 Energía perdida total en la ruta BM.

Una vez calculadas las pérdidas totales de energía para cada una de las rutas ya es posible calcular la energía total que será posible almacenar en el sistema que se propone, para utilizarla como soporte al motor de combustión.

En los gráficos que se muestran a continuación aparece la energía generada total (sin considerar las pérdidas) y la energía que se ha perdido. De esta forma queda reflejado para cada tramo la comparativa entre ambas.

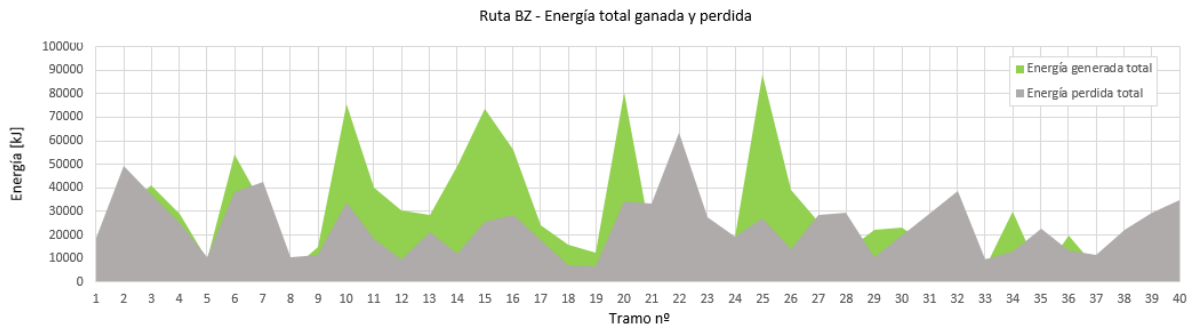


Gráfico 26 Energía total generada y perdida en la ruta BZ

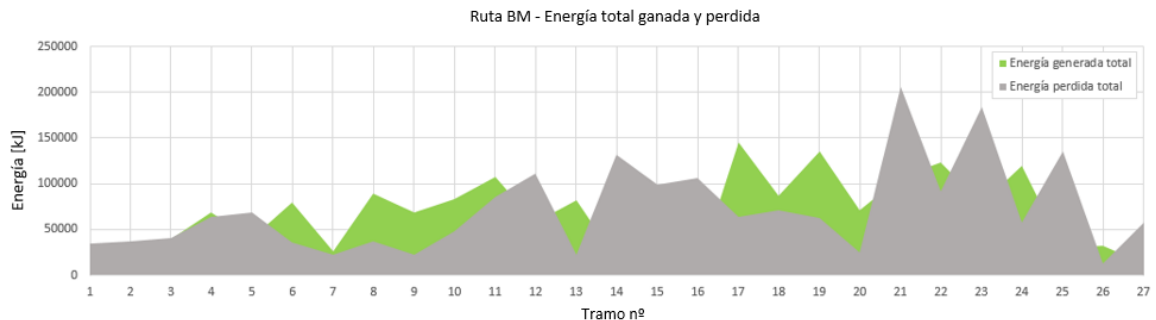


Gráfico 27 Energía total generada y perdida en la ruta BM

La diferencia entre ambas energías expresadas en los gráficos anteriores será el resultado de la energía que podría llegar a aprovecharse mediante el sistema de regeneración de energía que propone el presente estudio.

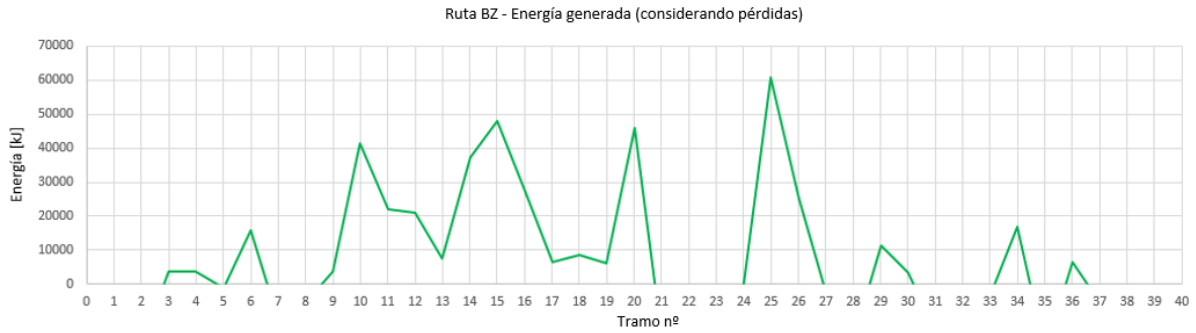


Gráfico 28 Energía generada real en la ruta BZ

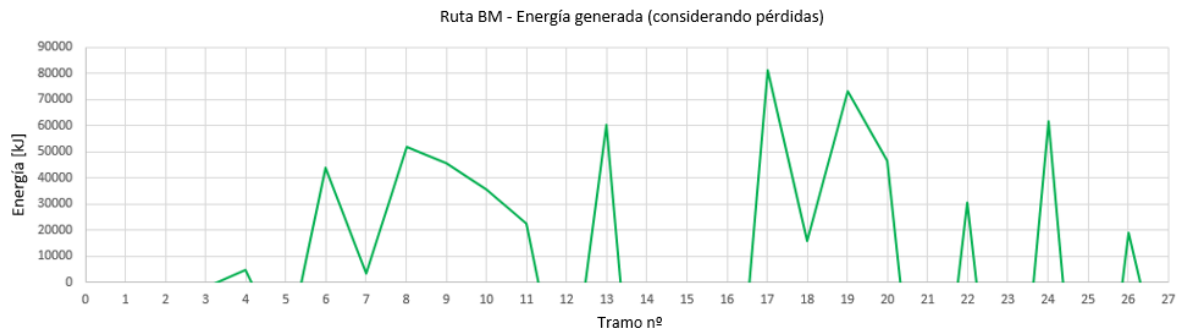


Gráfico 29 Energía generada real en la ruta BM

3.2.3.5 Cálculo de potencia generada

Con los resultados que se han obtenido, es necesario conocer la potencia que se va a generar en cada uno de los tramos, cuando estos actúan como bajada. De esta forma se evaluará la potencia que se puede generar durante cada uno de los tramos y observar la viabilidad del sistema que se propone.

Para cada uno de los tramos se ha calculado la potencia que se genera. Como se puede observar en los resultados obtenidos en la energía generada en cada tramo, hay algunos de ellos en los que no se logra generar energía, debido al reducido pendiente que supone. En estos tramos se ha considerado innecesario calcular la potencia media ya que no supone ninguna generación, que es objetivo del sistema que se propone. Por lo tanto únicamente se ha calculado la potencia en los tramos en los que se lograría generar potencia eléctrica mediante la siguiente expresión:

$$P_{generada_i} = \frac{E_{generada_i}}{t_i} = \frac{E_{generada_i}}{L_i/v}$$

Siendo

t_i = tiempo de recorrido del tramo

Aplicando la expresión anterior con la energía que sería posible generar (considerando pérdidas), se ha obtenido la siguiente potencia media que se podría regenerar en cada uno de los tramos, para ambas rutas:



Gráfico 30 Energía generada real en la ruta BZ

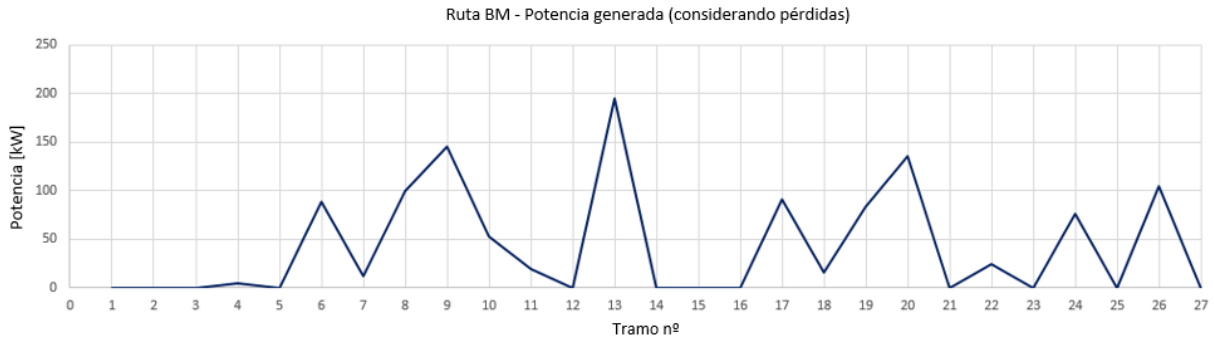


Gráfico 31 Energía generada real en la ruta BM

Observando los gráficos extraídos de los resultados se observan muchos picos con grandes cantidades de potencia que podría ser aprovechada como potencia eléctrica. Para la definición del motor/generador que sería preciso situar la potencia en un valor medio con el que componer nuestro sistema. Para ello se ha calculado la media de las potencias para cada una de las rutas mediante la siguiente expresión:

$$\bar{P} = \frac{\sum_j P_j \cdot L_j}{L_{tp}} = \frac{\sum_j E_j \cdot t_j}{t_{tp}}$$

Donde,

P_j = potencia media generada en el tramo j

L_j = distancia el tramo j

L_{tp} = longitud total de los tramos donde se genera energía

E_j = energía generada en el tramo j

t_j = tiempo de recorrido del tramo j

t_{tp} = tiempo total de recorrido de los tramos donde se genera energía

Siendo éstos, los tramos donde se genera energía, y no considerando los tramos donde no se puede obtener.

Los resultados para cada una de las rutas han sido los siguientes:

$$\bar{P}_{BZ} = 68,33 \text{ kW}$$

$$\bar{P}_{BM} = 59,03 \text{ kW}$$

Una vez obtenido estos resultados se puede observar que los valores están alrededor del objetivo inicial, que era cubrir el 20% de la potencia aportada por el motor de combustión, y este valor se situaba en los 60,21 kW.

3.3 COMPONENTES DEL SISTEMA

A continuación, en base a los cálculos previos realizados se va realizar la selección de los componentes necesarios para componer el sistema que regenerara la energía disponible que se ha obtenido y la reaprovechara aportando energía a la transmisión para reducir así la cantidad de energía térmica proveniente del motor de combustión.

3.3.1 MOTOR/GENERADOR ELÉCTRICO

La unidad motor/generador eléctrico sería el componente más importante del sistema. Este componente se encargaría de realizar el aporte de potencia al conjunto del vehículo, conjuntamente con el motor de combustión durante la marcha del vehículo y si dispone de energía en las baterías que se especifica más adelante.

Durante las fases de descenso realizaría la función opuesta. Sería el elemento encargado de transferir toda la energía que la capacidad específica le permitiera, a las baterías.

Una vez realizados los cálculos previos en cuanto a las capacidades que se podrían extraer de las dos rutas ejemplo propuestas, se ha evaluado los productos que existen en el mercado y se puedan aplicar al sistema que se propone. Este elemento debe de cumplir con las especificaciones que se han calculado y se detallan en la definición

de los requisitos. Tras esto se ha realizado una propuesta de alternativas entre la que se seleccionará la más adecuada para el objetivo concretado.

3.3.1.1 Definición de requisitos

El objetivo de este estudio es establecer un sistema que aporte el 20% de la potencia entregada por el motor de combustión, mediante energía eléctrica recuperada durante el funcionamiento del propio vehículo. A partir del primer punto del apartado del Diseño Conceptual del sistema se ha obtenido la potencia que efectuaría el motor de combustión a unas determinadas revoluciones. Con ello se ha obtenido una primera magnitud de la energía que debería aportar el motor eléctrico al conjunto de la unidad de potencia, que se aproxima a los resultados obtenidos en el estudio realizado.

3.3.1.2 Propuesta de alternativas

Alternativa 1: ZIEHL-ABEGG SM250.80D

La alternativa número uno, es un sistema de ZIEHL-ABEGG. El modelo SM250.80D es un motor síncrono de imanes permanentes. Este componente ha sido considerado como alternativa debido a sus características técnicas, aunque la aplicación habitual para este producto no sea el sector de la movilidad. Sin embargo, el gran par que puede aportar se ha considerado como una característica importante a tener en cuenta. [9]

SM250.80D	Especificaciones	
	Potencia	62,8 kW
	Par	2000 Nm
	Peso	1128 kg
	Velocidad	300 rpm

Tabla 10 Alternativa 1 de Motor/Generador eléctrico

Alternativa 2: SIEMENS SIVETEC MRS 7701

La alternativa número dos, es un sistema de SIEMENS. El modelo SIVETEC MRS 7701 es un motor síncrono desarrollado especialmente para vehículos híbridos. [10]

SIVETEC MRS 7701	Especificaciones
------------------	------------------


	Potencia	89,0 kW
	Par	250 Nm
	Peso	72 kg
	Velocidad	3300 rpm

Tabla 11 Alternativa 2 de Motor/Generador eléctrico

Alternativa 3: SIEMENS SIVETEC MSA 3300

La alternativa número tres, es un sistema también de SIEMENS. El modelo SIVETEC MSA 3300 es un motor síncrono que, al igual que la alternativa anterior, ha sido desarrollado especialmente para vehículos híbridos. Este sistema incorpora una ventaja importante y es que integra el inversor, compactando las dimensiones de forma significativa e incorporando ambos sistemas conexiónados sin tener la necesidad de añadir cableado para conectarlos. [10]

SIVETEC MSA 3300		Especificaciones	
		Potencia	60,0 kW
		Par	240 Nm
		Peso	55 kg
		Velocidad	2600 rpm

Tabla 12 Alternativa 3 de Motor/Generador eléctrico

3.3.1.3 Selección de alternativas

Para el proceso de selección entre las alternativas planteadas en el punto anterior se ha optado por la aplicación del método del Valor Técnico Ponderado (VTP) [11]. Para ello se sigue el siguiente procedimiento de cálculo:

- Definición de los criterios a evaluar.
- Asignación de pesos a cada uno de los criterios.
- Se asigna una puntuación absoluta a cada alternativa para cada uno de los criterios.

A continuación se detalla el cálculo del valor técnico ponderado de cada alternativa

Criterio	Peso	SM250.80D		SIVETEC MRS 7701		SIVETEC MSA 3300	
		Punt.	Punt. x Peso	Punt.	Punt. x Peso	Punt.	Punt. x Peso
Potencia [kW]	30	8	240	10	300	8	240
Par [Nm]	25	10	250	8	200	8	200
Peso [kg]	20	0	0	9	180	10	200
Velocidad [rpm]	10	4	40	10	100	8	80
Inversor	15	0	0	0	0	10	150
VTP		5,30		7,80		8,70	

Tabla 13 Evaluación VTP de Motor/Generador eléctrico

3.3.2 BATERÍA

La batería es el elemento que se encargaría de almacenar toda la energía posible que recibiría del motor/generador eléctrico, cuando entrara en funcionamiento el modo regenerativo. Por el contrario, durante el modo híbrido, sería el elemento encargado de transferir la energía que requiriera el motor/generador eléctrico, para éste poder proporcionarlo a la transmisión y suplir parte de la energía proveniente del motor de combustión.

3.3.2.1 Definición de requisitos

Con los resultados que se han obtenido, es necesario conocer la potencia que se va a generar en las baterías.

De los datos extraídos previamente, considerando que ésta va conectada a 350 V, se han obtenido las siguientes gráficas para ambas rutas:

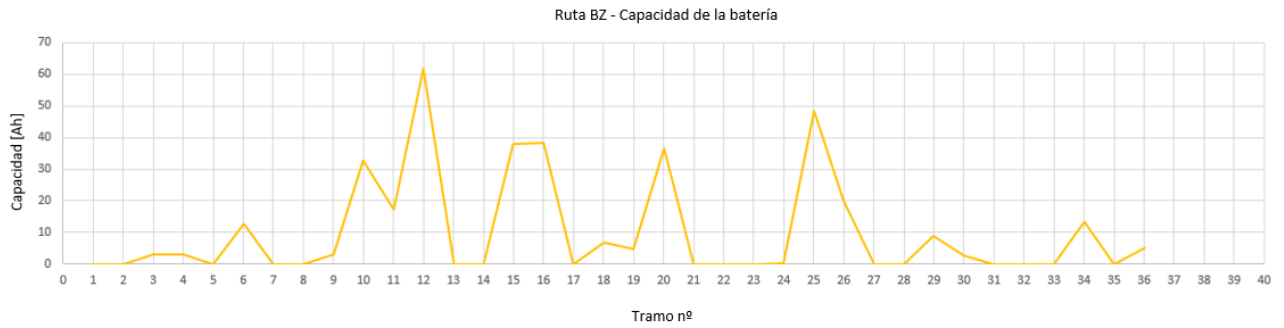


Gráfico 32 Capacidad de la batería en la ruta BZ

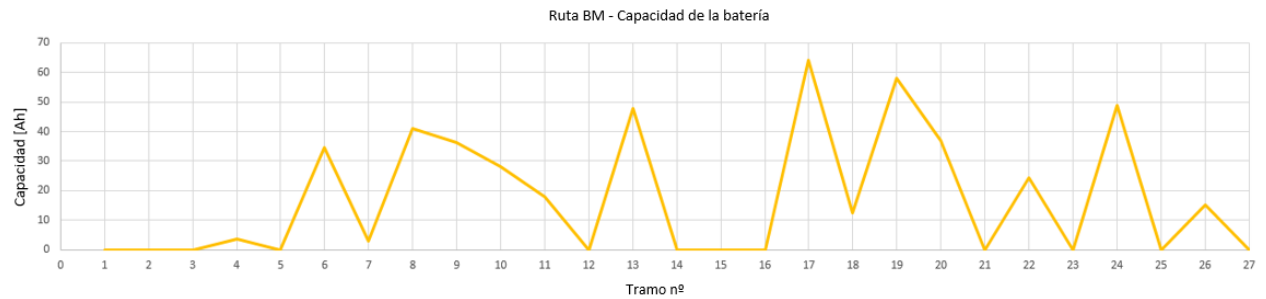


Gráfico 33 Capacidad de la batería en la ruta BM

Como se puede observar, los valores medios se sitúan entorno a los 30-40 Ah, mientras que si analizamos la capacidad energética, los valores elevados se sitúan entre los 15-20 kWh, como se observa a continuación:

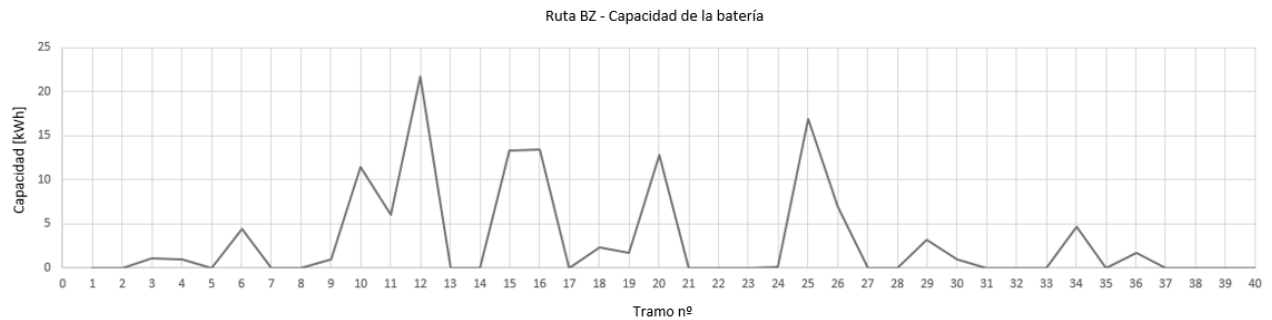


Gráfico 34 Capacidad de la batería en la ruta BZ

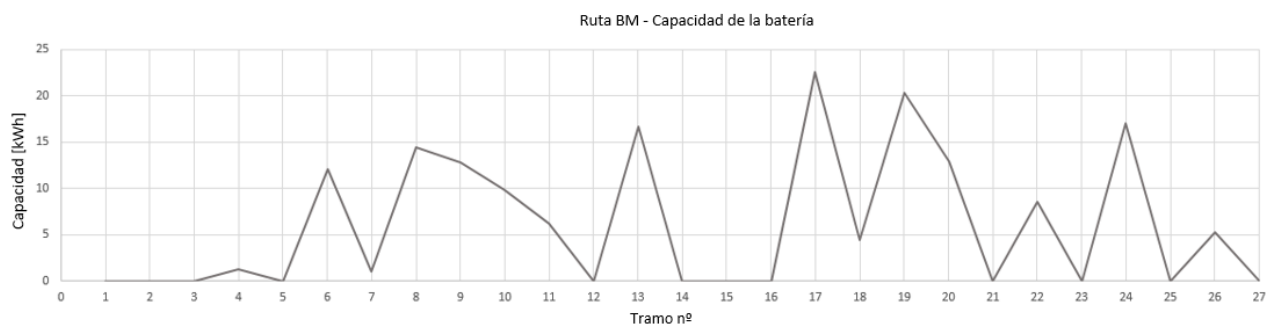


Gráfico 35 Capacidad de la batería en la ruta BM

Con estos datos se procede a la evaluación de las alternativas propuestas, que se detalla en el siguiente apartado.

3.3.2.2 Propuesta de alternativas

Alternativa 1: CATL EPVPBS10

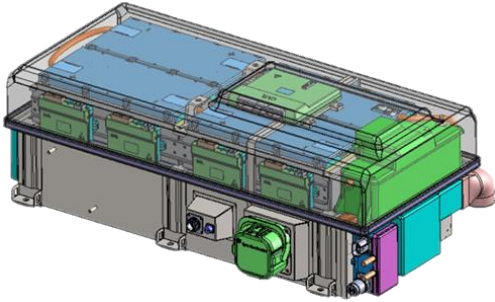
EPVPBS10	Especificaciones	
	Capacidad energética	10,0 kWh
	Capacidad de la célula	29,0 Ah LFP
	Voltaje nominal	345,6 V
	Peso	100,0 kg

Tabla 14 Alternativa 1 de Baterías

Alternativa 2: CATL EPVPBS28


EPVPBS28	Especificaciones	
	Capacidad energética	27,6 kWh
	Capacidad de la célula	80,0 Ah LFP
	Voltaje nominal	345,0 V
	Peso	237,0 kg

Tabla 15 Alternativa 2 de Baterías

Alternativa 3: CATL EPVPBS44

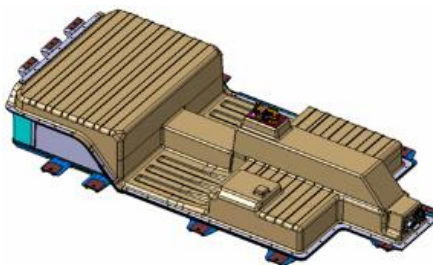
EPVPBS44	Especificaciones	
	Capacidad energética	44,0 kWh
	Capacidad de la célula	42,0 Ah NCM
	Voltaje nominal	375,0 V
	Peso	394,0 kg

Tabla 16 Alternativa 3 de Baterías

3.3.2.3 Selección de alternativas

Para el proceso de selección entre las alternativas planteadas en el punto anterior se ha optado por la aplicación del método del Valor Técnico Ponderado (VTP) [11]. Para ello se sigue el siguiente procedimiento de cálculo:

- Definición de los criterios a evaluar
- Asignación de pesos a cada uno de los criterios.
- Se asigna una puntuación absoluta a cada alternativa para cada uno de los criterios.

A continuación se detalla el cálculo del valor técnico ponderado de cada alternativa

Criterio	Peso	EPVPBS10		EPVPBS28		EPVPBS44	
		Punt.	Punt. x Peso	Punt.	Punt. x Peso	Punt.	Punt. x Peso
Capacidad energética [kWh]	30	4	120	8	240	10	300
Capacidad de la célula [Ah]	30	4	120	10	300	6	180
Voltaje nominal [V]	15	9	135	9	135	10	150
Peso [kg]	25	10	250	5	125	0	0
VTP		6,25		8,00		6,30	

Tabla 17 Evaluación VTP de Baterías

3.3.3 CONEXIONADO ELÉCTRICO

Una vez obtenida la batería el motor/generador eléctrico ya es posible conocer la tensión de conexión que habrá entre ambos elementos. Como se ha especificado en el apartado de la batería, esta tensión será de 345 V.

Para esta tensión se ha buscado un cable que incorporara ese valor en su rango de tensiones. Además de esto se ha considerado importante el hecho de que tuviera propiedades antiinflamatorias para evitar cualquier inicio de llama dentro del vehículo que pueda generar un grave incidente. Por este mismo motivo se ha considerado importante que tuviera la característica de que no propagara la llama en caso de ésta se inicie próxima al cable o sobre el mismo, evitando lo mismo comentado previamente.

El cable que se ha seleccionado es el SABIX A 146 FRNC, que sería el más idóneo para las características requeridas.


SABIX A 146 FRNC	Especificaciones	
	Tensión nominal	300/500 V
	Rango de temperatura	-30/+90 °C
	Anti inflamable	Sí
	Anti propagación de llama	Sí

Tabla 18 Características del cable SABIX A 146 FRNC

3.3.4 TRANSMISIÓN

El sistema de engranajes es el conjunto de elementos que se encarga de transferir la potencia generada por el sistema de propulsión al eje de las ruedas.

Este sistema deberá ser capaz de transferir la potencia de cada uno de los motores, térmico y eléctrico, tanto de forma individual como trabajando en paralelo.

Debido al tipo de funcionamiento que va a ejercer se ha tenido en cuenta el sistema Power Split Device desarrollado por Toyota, que consiste en un tren de engranajes epicicloidal. A este sistema se le han aplicado ciertos cambios que se explicarán a continuación.

El sistema consiste en un tren epicicloidal con la configuración que se muestra a continuación:

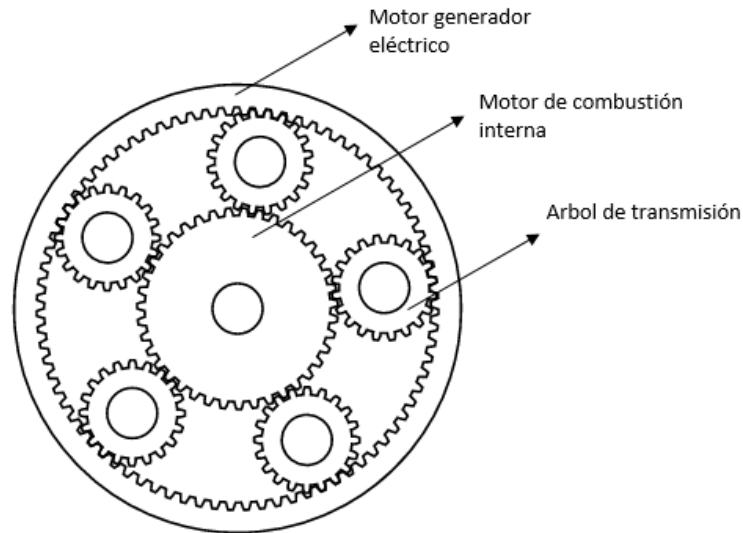


Imagen 33 Esquema de la transmisión tipo PSD propuesta

Para la aplicación actual se ha modificado la configuración con respecto al sistema de Toyota. En este caso se ha optado por conectar la corona al árbol de transmisión que va directamente a las ruedas; el sol (engranaje central) se conectaría al motor de combustión; y el portaplanetas se une al motor generador eléctrico.

Este sistema tendría tres modos de funcionamiento:

3.3.4.1 Modo convencional

En este caso, únicamente el motor de combustión accionaría las ruedas, sin soporte del motor eléctrico. Este es el método de funcionamiento del vehículo convencional.

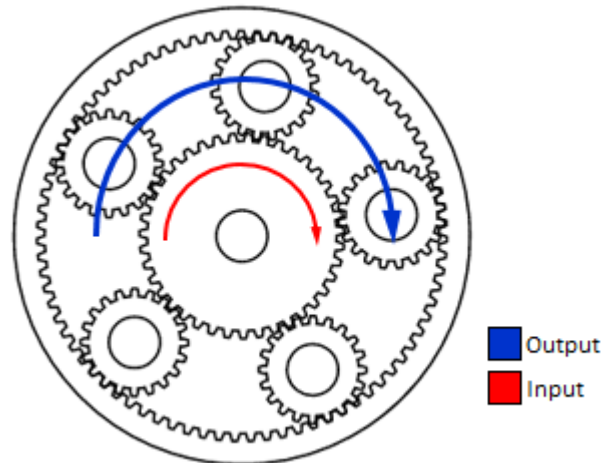


Imagen 34 Esquema de la Transmisión en funcionamiento en modo convencional

3.3.4.2 Modo híbrido

En el modo híbrido, tanto el motor eléctrico como el motor de combustión actúan como sistema de propulsión sobre el movimiento del vehículo de forma paralela.

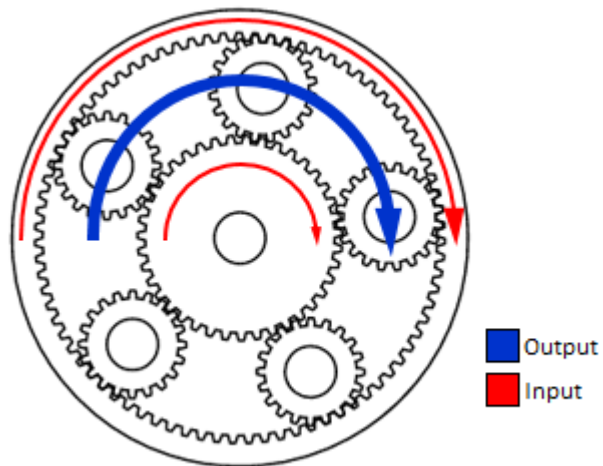


Imagen 35 Esquema de la Transmisión en funcionamiento en modo híbrido

3.3.4.3 Modo regenerativo

Durante el modo regenerativo el engranaje correspondiente al motor de combustión no actuaría, y sería la transmisión que viene del eje la que transferiría el movimiento al motor/generador eléctrico, para que éste, a su vez, transfiriera la energía generada a las baterías para almacenarla.

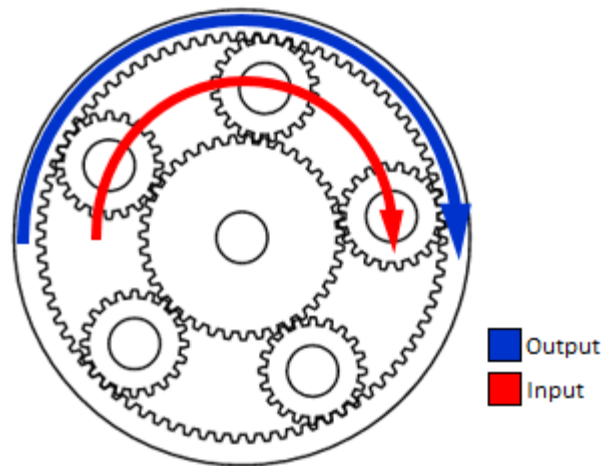


Imagen 36 Esquema de la Transmisión en funcionando en modo regenerativo

4 VIABILIDAD MEDIOAMBIENTAL

En este apartado se va a evaluar el impacto medioambiental que tendría la aplicación del sistema propuesto en las rutas que se han utilizado como ejemplo.

Para la realización de esta evaluación de viabilidad económica, se ha considerado los siguientes días laborables (datos de 2016) [12]:

$$\text{días laborables (2016)} = 250 \text{ días}$$

Según las fuentes consultadas [13] [14] [15], los valores de emisiones de CO₂ a la atmosfera que corresponden a vehículos de estas características se sitúan en los siguientes valores:

$$2,653 \text{ kg CO}_2 \text{ por cada litro de Gasoil}$$

Los consumos han sido obtenidos a través de la misma empresa que ha proporcionado los datos de las rutas evaluadas.

A continuación se detallan los resultados obtenidos, en lo referente a las emisiones de CO₂:

Ruta	Consumo [L/100km]	Distancia diaria [km]	Distancia anual [km]	Combustible diario [L]	Combustible anual [L]	Emisiones CO ₂ [kg]
BZ (ida y vuelta)	34,50	629,18	157.295,00	217,07	54.266,78	143.958,90
BM (ida)	36,00	637,39	79.673,75	229,46	28.682,55	76.089,07
BM (vuelta)	34,50	637,39	79.673,75	219,90	27.487,44	72.918,69
Total	-	1.903,96	316.642,50	666,43	110.436,77	292.966,66

Tabla 19 Evaluación de emisiones de CO₂ actual

Los resultados que aparecen en la tabla anterior han sido considerados de la siguiente manera:

- Ruta BZ: la ida y regreso se realiza en el mismo día.
- Ruta BM: la ida se hace un día 'n' y la vuelta se realiza en el día 'n+1'.

Es por ello que las distancias diarias se asemejan entre ambas rutas, y la ruta BM aparece dos veces, distinguiendo la ida de la vuelta.

Como se puede observar en los resultados anteriores, únicamente dos vehículos pesados realizando rutas habituales de media-larga distancia generan una cantidad muy elevada de emisiones a la atmosfera, estimadas según este estudio en 292.966,66 kilogramos de CO₂, casi 300 toneladas durante un año.

Con el sistema propuesto, supliendo el 20% de la energía proveniente del motor de combustión con energía eléctrica regenerada durante el trayecto, los resultados se reflejarían de la siguiente manera.

Ruta	Consumo [L/100km]	Distancia diaria [km]	Distancia anual [km]	Combustible diario [L]	Combustible anual [L]	Emisiones CO ₂ [kg]
BZ (ida y vuelta)	27,60	629,18	157.295,00	173,65	43.413,42	115.167,12
BM (ida)	28,80	637,39	79.673,75	183,57	22.946,04	60.871,25
BM (vuelta)	27,60	637,39	79.673,75	175,92	21.989,96	58.334,95
Total	-	1.903,96	316.642,50	533,14	88.349,42	234.373,33

Tabla 20 Evaluación de emisiones de CO₂ con el sistema de regeneración

Se puede observar que anualmente, para estas dos rutas, con un único vehículo por ruta el ahorro de emisiones sería de **58.593,33 kg CO₂**.

Si se hace referencia a los datos expuestos en el apartado de Justificación, con la aplicación del sistema que propone este documento, la reducción de emisiones sería la que aparece en la siguiente tabla:

	Consumo [L/100km]	Distancia anual [km/veh]	Distancia anual total [km]	Combustible anual total [L]	Emisiones CO ₂ [kg]
Actual	36,50	120.000	11.522.640.000	420.576.360.000	1.115.704.967.808
Con SRE	29,20	120.000	11.522.640.000	336.461.088.000	892.563.974.246

Tabla 21 Evaluación de emisiones de CO₂ total

Solamente en España se estaría evitando la emisión de **223.140.993.561 kg de CO₂**.

5 VIABILIDAD ECONÓMICA

A continuación se va a evaluar el impacto económico que tendría la aplicación del sistema propuesto en las rutas que se han utilizado como ejemplo.

Para la realización de esta evaluación de viabilidad económica, se han considerado los mismos valores que en el apartado anterior, en lo que a días se refiere [12], y precio de combustible [16]:

$$\text{días laborables (2016)} = 250 \text{ días}$$

$$\text{precio promedio gasoil (2016)} = 1,0151 \text{ €/L}$$

Se han tomado valores de 2016 ya que éstos son los más recientes que existen de

A continuación se muestran los resultados del estatus actual, sin la incorporación del sistema propuesto en este estudio:

Ruta	Consumo [L/100km]	Distancia diaria [km]	Distancia anual [km]	Combustible diario [L]	Combustible anual [L]	Coste anual [€]
BZ (ida y vuelta)	34,50	629,18	157.295,00	217,07	54.266,78	55.086,20
BM (ida)	36,00	637,39	79.673,75	229,46	28.682,55	29.115,66
BM (vuelta)	34,50	637,39	79.673,75	219,90	27.487,44	27.902,50
Total	-	1.903,96	316.642,50	666,43	110.436,77	112.104,36

Tabla 22 Evaluación económica actual

Lo resultados que aparecen en la tabla anterior han sido considerados, al igual que en el apartado anterior, de la siguiente manera:

- Ruta BZ: la ida y regreso se realiza en el mismo día
- Ruta BM: la ida se hace un día 'n' y la vuelta se realiza en el día 'n+1'

Se puede observar que únicamente dos vehículos pesados realizando rutas habituales de media-larga distancia generan un impacto elevado en cuanto al coste del carburante. Mediante las aproximaciones realizadas, este coste sería de 112.104,36 €.

Con el sistema propuesto, supliendo el 20% de la energía proveniente del motor de combustión con energía eléctrica regenerada durante el trayecto, los resultados se reflejarían de la siguiente manera.

Ruta	Consumo [L/100km]	Distancia diaria [km]	Distancia anual [km]	Combustible diario [L]	Combustible anual [L]	Coste anual [€]
BZ (ida y vuelta)	27,60	629,18	157.295,00	173,65	43.413,42	44.068,96
BM (ida)	28,80	637,39	79.673,75	183,57	22.946,04	23.292,53
BM (vuelta)	27,60	637,39	79.673,75	175,92	21.989,96	22.322,00
Total	-	1.903,96	316.642,50	533,14	88.349,42	89.683,49

Tabla 23 Resumen de la evaluación económica con el sistema de regeneración

Se puede observar que anualmente, para estas dos rutas, con un único vehículo por ruta el ahorro sería de **22.420,87 €**.

Una vez evaluado el ahorro económico que supone la reducción del consumo de combustible se ha procedido a calcular el posible coste del sistema. Para ello se han estimado los costes de cada una de las partidas debido a que los componentes del sistema son elementos que actualmente están en desarrollo, o son muy novedosos y no se ha podido acceder a los precios concretos de estos sistemas. Este coste incluiría el montaje en vehículo, es decir la implementación completa del sistema en un camión como los que podemos encontrar hoy en día en el mercado del sector.

El resumen del coste del sistema sería el siguiente:

Concepto	Unidades	Coste unitario	Coste
Motor/Generador eléctrico	1,00 ud	5.316,00 €/ud	5.316,00 €
Inversor (incluido en el MG eléctrico)	1,00 ud	1.273,00 €/ud	1.273,00 €
Batería	27,60 kWh	200,00 €/kWh	5.520,00 €
Cableado	1,00 ud	274,00 €/ud	274,00 €
Transmisión	1,00 ud	3.421,00 €/ud	3.421,00 €
Elementos de conexión	1,00 ud	325,00 €/ud	325,00 €

Mano de obra	40,00 h	80,00 €/h	3.200,00 €
Adaptación vehículo	1,00 ud	3.250,00 €/ud	3.250,00 €
Total	-	-	22.579,00 €

Tabla 24 Resumen del coste de instalación del sistema

En esta evaluación de costes del sistema no se ha incluido los costes de desarrollo e industrialización, debido a que estos costes dependerían directamente del volumen de producción que se requiriera y se repartirían de forma equitativa en precio por pieza.

Con la estimación realizada el coste de la compra e instalación del sistema sería de **22.579,00 €**.

Esto supondría un ahorro de

$$\frac{22.579,00 \text{ €}}{316.642,50 \text{ km}} = 0,071307 \text{ €/km}$$

Si esto lo extrapolamos a los datos representados en la Justificación, obtendríamos el siguiente ahorro por cada camión:

$$0,071307 \frac{\text{€}}{\text{km}} \cdot 120.000 \frac{\text{km}}{\text{vehículo}} = \mathbf{8.556,91 \frac{\text{€}}{\text{camión}}}$$

6 CONCLUSIONES

Una vez realizado el Estudio de un sistema de recuperación de energía para camiones se procede a mostrar las conclusiones que se han extraído durante la realización de este documento.

El presente estudio tenía como requerimiento evaluar la posibilidad de substituir un 20% de la energía que es entregada por el motor de combustión por energía eléctrica recuperada mediante un sistema de regeneración de energía. Este sistema debía regenerar la energía durante el trayecto, siendo su única fuente la energía que a día de hoy se está disipando en forma de pérdidas.

Los resultados de la evaluación sobre la cantidad de energía eléctrica que podía generarse, durante el trayecto de dos rutas ejemplo, han concluido que existe una importante cantidad de potencia eléctrica que sería reutilizable mediante sistemas eficientes que fueran capaces de almacenarla.

Se ha realizado una propuesta de sistema con el que se ha evaluado el impacto medioambiental y económico que supondría su instalación en un vehículo. Los resultados han confirmado que en el aspecto medioambiental tendría un gran impacto, llegando a reducir casi 225 toneladas de CO₂ a la atmosfera, durante un año, en el caso de que todos los camiones utilizaran dicha tecnología. En cuanto a lo económico, también existe una gran repercusión, ya que en caso de proceder con la instalación del sistema propuesto durante el tercer año ya se habría recuperado la inversión y ya comenzaría a ahorrar 8.556,91 € anuales por camión.

7 TRABAJOS FUTUROS

Este estudio abre las puertas a diversas líneas de investigación de cara a futuras actividades relacionadas con lo que plantea este documento.

Entre otros, con los resultados obtenidos, se abriría la posibilidad de desarrollar las actividades definidas a continuación:

- **Diseño de un sistema de regeneración de energía compacto para camiones**

Se propone la posibilidad de desarrollar el sistema de regeneración de energía propuesto en este documento, entrando en detalle en los componentes que compondrían el sistema. Con los datos que se han extraído de este estudio, sería posible desarrollar el sistema completo, entrando en profundidad en la selección de los elementos y la interconexión que existiría entre ellos, así como también el estudio de ubicarlo en el vehículo. La peculiaridad de este proyecto sería el de tratar de compactar al máximo dicho sistema, con el objetivo de que fuera una única unidad a montar en cada uno de los vehículos.

Definición de las tareas a seguir:

1. Definición exhaustiva de los elementos que deben componer el sistema.
2. Definición exhaustiva de las especificaciones básicas del sistema a desarrollar.
3. Selección de alternativas y/o diseño de los elementos seleccionados.
4. Estudio de ubicación dentro de un camión.
5. Evaluación de la viabilidad técnica de la propuesta.
6. Evaluación de la viabilidad económica de la propuesta.
7. Evaluación de la viabilidad medioambiental de la propuesta.

La estimación de tiempo para cada una de las tareas se presenta a continuación:

	Dedicación semanal [horas/semana]	Semanas necesarias	Horas totales
Actividad 1	25	2	50
Actividad 2	25	2	50
Actividad 3	25	4	100
Actividad 4	25	4	100
Actividad 5	25	3	75
Actividad 6	25	2	50
Actividad 7	25	1	25
TOTAL	-	18	450

Tabla 25 Estimación de tiempo para la propuesta 1

- **Diseño del sistema de control para el sistema de regeneración de energía**

Una vez desarrollado el presente estudio se abre la posibilidad de desarrollar todo el sistema de control que se encargaría de gestionar la actuación de cada uno de los componentes en base a lo que ya se ha definido en este documento. Este sistema debería detectar en cada momento si se encuentra en una pendiente positiva o negativa, y si es lo suficientemente inclinada como para generar dicha energía. También debería gestionar la carga de las baterías, así como la potencia a entregar por parte del motor eléctrico.

Definición de las tareas a seguir:

1. Definición exhaustiva de los elementos que deben componer el sistema.
2. Definición exhaustiva de las especificaciones básicas del sistema.
3. Definición de las condiciones operativas de los componentes a controlar.
4. Diseño y desarrollo del hardware y el software.
5. Evaluación de la viabilidad técnica de la propuesta.
6. Evaluación de la viabilidad económica de la propuesta

La estimación de tiempo para cada una de las tareas se presenta a continuación:

	Dedicación semanal [horas/semana]	Semanas necesarias	Horas totales
Actividad 1	25	2	50
Actividad 2	25	2	50
Actividad 3	25	3	75
Actividad 4	25	4	100
Actividad 5	25	2	50
Actividad 6	25	2	50
TOTAL	-	15	375

Tabla 26 Estimación de tiempo para la propuesta 2



8 RESUMEN ECONÓMICO

El presupuesto del presente estudio se ha valorado en 11.460,00 € (once mil cuatrocientos sesenta euros) sin el IVA incluido.

El desglose de este coste se puede ver detallado en el documento PRESUPUESTO.

9 BIBLIOGRAFÍA

- [1] <http://www.dgt.es/es/seguridad-vial/estadisticas-e-indicadores/parque-vehiculos/>
- [2] https://www.fomento.gob.es/MFOM/LANG_CASTELLANO/DIRECCIONES_GENERALES/TRANSPORTE_TERRESTRE/SERVICIOS_TRANSPORTISTA/OBSERVATORIO_COSTES/observatorios.htm
- [3] <http://www.aficionadosalamecanica.net/hibridos.htm>
- [4] https://es.wikipedia.org/wiki/Freno_din%C3%A1mico
- [5] https://es.wikipedia.org/wiki/AMC_Amitron
- [6] <http://www.volvotrucks.es/es-es/trucks/volvo-fh-series/volvo-fh16.html>
- [7] *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles*. CRC PRESS, Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Sebastien E. Gay, Ali Emadi.
- [8] <https://w3.siemens.com/topics/global/de/elektromobilitaet/>
- [9] <http://www.ziehl-abegg.com>
- [10] https://w3.siemens.com/topics/global/de/elektromobilitaet/PublishingImages/home/pdf/Siemens-Volvo-C30-Electric_EN.pdf
- [11] *Estudio de implantación de energías renovables para el orfanato “Ciudad de los Niños” en Guatemala*. UPC Commons. Enrique Martinell Andreu
- [12] http://www.dias-laborables.es/dias_laborables_feriados_2017.htm#am1d
- [13] <https://www.sunearthtools.com/es/tools/CO2-emissions-calculator.php>
- [14] <http://arboliza.es/compensar-co2/calculo-co2.html>
- [15] https://es.wikipedia.org/wiki/Humo_din%C3%A1mico#Componentes_qu%C3%ADmicos
- [16] <http://www.cetm.es/principal/carburantes/Gasoleos/datos.asp>